Міністерство освіти і науки України

Запорізький національний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

Інженерний навчально-науковий інститут ім Ю.М. Потебні
( назва факультету)

Кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки
(повна назва кафедри )

# Кваліфікаційна робота

на тему *«Дослідження та розробка способу знешкодження високомінералізованих стічних вод металургійних виробництв»*

Виконав: студент *2* курсу, групи *8.183З*

спеціальності
*183 Технології захисту навколишнього середовища*
освітньої програми
*Технології захисту навколишнього середовища*

спеціалізації
_____
(шифр і назва)
*О.П. Дегтярьов*

Керівник *доцент, к.ф.-м. н. Вагін А.В.*

Рецензент *доцент, к.т.н. Бєлоконь К.В.*
(прізвище та ініціали) (підпис)

Запоріжжя
2024

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**
**ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**
**ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ**
**ім Ю.М. ПОТЕБНІ**

Кафедра _____*металургійних технологій, екології та техногенної безпеки*_____

Рівень вищої освіти _____*другий магістерський рівень*_____
(другий (магістерський) рівень)

Спеціальність ___*183 Технології захисту навколишнього середовища*_____
(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма ___*Технології захисту навколишнього середовища*
(шифр і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**
Завідувач кафедри _____*МТЕТБ*_____
_____ *Ю.О. Бєлоконь*__

«____» _____2024 року

# З А В Д А Н Н Я
## НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

_____Дегтярьов Олексій Петрович_____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Дослідження та розробка способу знешкодження високомінералізованих стічних вод металургійних виробництв»_____
_____

керівник роботи_____*Вагін Андрій Вікторович*_____*к.ф.-м.н., доцент*____
( прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом вищого навчального закладу від *"__"*_____ 2024 року *№* _____

2. Строк подання студентом роботи _____*06.12.2024*_____

3. Вихідні дані до роботи - дослідити вплив характеристик теплоносія на режими роботи та конструктивні параметри випарного апарату._____

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) *вступ, перелік умовних позначень, загальна частина, спеціальна частина, охорона праці та техногенна безпека, Висновки. Перелік джерел посилань.*_____

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
*презентаційний матеріал на 11 слайдах (на 11 сторінках)*_____
_____

6. Консультанти розділів роботи

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата завдання прийняв |
|---|---|---|
| *Загальна частина* | *Вагін А.В., доцент* | |
| *Спеціальна частина* | *Вагін А.В., доцент* | |
| *Охорона праці та техногенна безпека* | *Вагін А.В., доцент* | |
| *Нормоконтроль* | *Вагін А.В., доцент* | |

7. Дата видачі завдання_____

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів кваліфікаційної роботи | Строк виконання етапів роботи | Примітка |
|---|---|---|---|
| *1* | *Вступ* | | |
| *2* | *Загальна частина* | | |
| *3* | *Спеціальна частина* | | |
| *4* | *Охорона праці та техногенна безпека* | | |
| *5* | *Висновки* | | |
| *6* | *Презентація* | | |

**Студент** _____ *Олексій ДЕГТЯРЬОВ*

**Керівник роботи** _____ *Андрій ВАГІН*

**Нормоконтроль пройдено**

Нормоконтролер _____ *Андрій ВАГІН*

# Реферат

Кваліфікаційна робота: 93 стор., 4 табл., 11 рис., 12 джерел.

СТІЧНІ ВОДИ, ДЕМІНЕРАЛІЗАЦІЯ, ТЕРМІЧНЕ ЗНЕШКОДЖЕННЯ, РОЗСОЛИ, ВИПАРОВУВАННЯ, ВИПАРНІ УСТАНОВКИ, ПРОМІЖНИЙ ТЕПЛОНОСІЙ, ГІДРАВЛИЧНИЙ ОПІР.

**Мета кваліфікаційної роботи** – дослідити вплив характеристик теплоносія на режими роботи та конструктивні параметри випарного апарату.

У квалфікаційній роботі розглянуто існуючі способи та типи установок для знешкодження високомінералізованих стічних вод, випарні апарати та їх характеристики, проаналізовано їх переваги та недоліки та обрано найкращий метод для знешкодження високомінералізованих стічних вод; узагальнено висновки щодо вибору методу, його переваги та перспективи. У спеціальній частині розглянуто основні характеристики теплоносія, що впливають на режими роботи та конструктивні параметри випарного апарату, тобто розглянуто особливості нагрівання та охолодження середовищ у випарному апараті, де в його об'ємі або в окремих зонах можливі різні напрямки процесів тепло- та масообміну, що визначаються параметрами взаємодіючих рідини та газу. У експериментальній частині було проведено лабораторні дослідження залежності гідравлічного опору та коефіцієнта тепловіддачі від характеристик теплоносія та наведено результати досліджень процесу випарювання високомінералізованих стічних вод. У розділі «Охорона праці та техногенна безпека» розроблено заходи щодо техніки безпеки, промислової санітарії та протипожежної техніки у лабораторії, в якій знаходиться випарний апарат.

**Зміст**

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ . . . . . 7
ВСТУП . . . . . 11
1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА . . . . . 13
1.1 Характеристика високомінералізованих стічних вод . . 13
1.1.1 Стічні води водопідготовчих установок та парогенераторів . 13
1.1.2 Стічні води травильних відділень . . . . . 16
1.1.3 Стічні води локальних систем водопостачання . . . 18
1.2 Існуючі методи знешкодження високомінералізованих стічних вод . . . . . 20
1.3 Характеристика випарних установок для знешкодження високомінералізованих стічних вод . . . . . 29
1.4 Особливості термічного знешкодження високомінералізованих стічних вод у випарних установках . . . . . 35
2 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА . . . . . 46
2.1 Гідродинаміка випарних апаратів . . . . . 47
2.1.1 Гідродинамічні режими . . . . . 47
2.1.2 Гідравлічний опір . . . . . 48
2.1.3 Доведення залежності гідравлічного опору проміжного твердого теплоносія при випаровуванні високомінералізованих стоків . . 53
2.2 Тепловий розрахунок випарних апаратів . . . . 59
2.3 Лабораторні дослідження гідродинамічних та теплових режимів випарного апарату при знешкодженні високомінералізованих стічних вод на проміжному твердому теплоносії . . . . . 62
2.3.1 Опис лабораторної установки . . . . . 62
2.3.2 Методика проведення досліджень . . . . . 63
2.3.3 Обробка результатів експерименту визначення залежності гідравлічного опору . . . . . 66

2.3.4 Обробка результатів експерименту визначення залежності коефіцієнта тепловіддачі . . . . . 69
3 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА . . . . 79
3.1 Аналіз потенційно небезпечних та шкідливих факторів, що впливають на працівника лабораторії . . . . . 79
3.2 Електробезпека . . . . . 85
3.3 Пожежна безпека . . . . . 87
ВИСНОВКИ . . . . . 90
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ . . . . . 92

# ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

$w_г$, $w_р$ – швидкість газу та рідини;

$w_і$ – швидкість газу в точці інверсії;

$\bar{u}_0$ – щільність зрошення;

$U_р$ – щільність зрошення рідиною;

$L$, $G$ – витрата рівдини та газу;

$\rho_Г$, $\rho_р$, $p_о$, $p_в$ – щільність газу, рідини, повітря та води;

$\mu_Г$, $\nu_Г$ – коефіцієнти динамічної та кінематичної в'язкості газу;

$\mu_р$, $\nu_р$ – коефіцієнти динамічної та кінематичної в'язкості рідини;

$\Delta p$ – гідравлічний опір;

$\Delta p_c$ – гідравлічний опір шару зрошуваної сухої насадки;

$\Delta p_o$ – гідравлічний опір шару зрошуваної змоченої насадки;

$\lambda^T$ – коефіцієнт гідравлічного опору насадки;

$a$ – питома поверхня насадки;

$\varepsilon$ – частка не зайнятого зернистими елементами об'єму шару (порізність);

$g$ – прискорення вільного падіння;

$c$ – постійна, залежна від типу, розміру та способу завантаження насадки;

$d$ – діаметр насадки (металевих куль);

$d_e$ – еквівалентний діаметр;

$d_{ср}$ – середній діаметр куль;

$H$ – висота насадки;

$L'$, $L''$ – витрата рідини (розчину) на вході та виході апарату;

$x'$, $x''$ – вміст рідини в газі на вході та виході апарату;

$b'$, $b''$ – концентрації рідини на вході та виході апарату;

$c'_Г$, $c''_Г$ – теплоємність газу на вході та виході апарату;

$t'_Г$, $t''_Г$ – температури газу на вході та виході апарату;

$i'$, $i''$ – ентальпії газу на вході та виході апарату;

$c'$, $c''$ – теплоємності рідини на вході та виході апарату;

$\vartheta'$, $\vartheta''$ – температури рідини на вході та виході апарату;

$S_{\text{ос}}$ – маса осаду, що виділився з рідини;

$c_{\text{ос}}$ – теплоємність осаду;

$Q_n$ – втрати тепла у навколишнє середовище;

$Q_{к.а}$ – розрахункова кількість передаваємої теплоти;

$Q_{\text{р}}$ – тепло, передане розчину в апараті;

$Q_{\text{вн}}$ – «внутрішнє» тепло апарату;

$a$, $\beta$ – коефіцієнти тепловіддачі та масовіддачі;

$k_{\text{V}}$, $k_{\text{F}}$ – об'ємний та поверхневий коефіцієнти теплопередачі;

$V$ – робочий об'єм апарату;

$F$ – поверхня контакту фаз;

$\Delta t_{ср}$ – середній температурний напір;

$\Delta P$ – загальна втрата напору газу під час руху через насадку;

$\Delta P_T$ – втрата напору, зумовлена тертям;

$\Delta P_M$ – втрата напору, зумовлена гідродинамічними чи місцевими опорами;

$f_T$ – безрозмірний коефіцієнт тертя;

$\gamma$ – питома вага газу;

$m$ – гідравлічний радіус, що дорівнює відношенню вільного об'єму насадки до поверхні в одиниці об'єму (в 1 м$^3$);

$\overline{F}_A$ – середній живий переріз насадки – величина чисельно рівна вільному об'єму;

$\Delta P_c$ – втрата напору, обумовлена стисненням газового струменя;

$\Delta P_p$ – втрата напору, зумовлена розширенням газового струменя;

$f'$ – загальний коефіцієнт опору насадки;

$A$ – коефіцієнт теплопровідності;

$V_н$ – об'єм насадки;

$V_к$ – об'єм куль;

$S_н$ – вага насадки;

$q$ – тепловий потік;

$R$ – радіус куль;

$Ar$ – критерій Архімеда;

$Ki$ – критерій Кірпичова;

$Nu$ – критерій Нусельта;

$\mathrm{Re}'_Г$, $R_{умов}$ – модифікований та умовний критерій Рейнольдса;

$\mathrm{Pr}$ – критерій Прандтля;

$Fr$ – критерій Фруда;

$\rho_в$ – питомий опір ґрунту для вертикального заземлювача;

$\rho_г$ – питомий опір ґрунту для горизонтального заземлювача;

$R_0$ – опір розтіканню струму одиночного вертикального заземлювача;

$R_в$ – опір розтіканню струму групи вертикальних заземлювачів;

$l_г$ – довжина горизонтальної сполучної смуги;

$R_г$ – опір горизонтальної смуги;

$R_з$ – опір заземлювачів;

$t_{max}$ – максимальна трудомісткість чи тривалість виконання роботи;

$t_{min}$ – мінімальна трудомісткість;

$t_i$ – очікувана трудомісткість;

$K_{ВН}$ – коефіцієнт виконання норм;

$T_у$ – тривалість виконання роботи;

$S_е$ – вартість електроенергії;

$T_{ie}$ – тариф на 1 кВт/год електроенергії;

$N_{ia}$ – встановлена потужність і-го виду обладнання;

$T_{iд}$ – час використання і-го виду обладнання;

$m_i$ – кількість обладнання;

$S_а$ – амортизаційні відрахування від вартості обладнання;

$N_{ам}$ – норма амортизаційних відрахувань для даного виду обладнання;

$K_i$ – вартість обладнання;

$T_д$ – тривалість використання обладнання;

$T$ – можлива кількість годин використання обладнання протягом року;

$I_{викон}$ – основна заробітна плата виконавців;

$З_{окл}$ – посадовий оклад;

$T_{мес}$ – кількість днів у робочому місяці;

$О_{сс}$ – відрахування на державне соціальне страхування;

$О_{бр}$ – відрахування до фонду соціального страхування у разі безробіття;

$О_{нв}$ – відрахування до фонду страхування від нещасних випадків;

$О_{пф}$ – відрахування до пенсійного фонду;

$H_р$ – накладні витрати.

# ВСТУП

Однією з основних проблем сучасного металургійного виробництва є розробка заходів щодо охорони навколишнього середовища від забруднень, що потрапляють у водойми та ґрунти зі стічними промисловими водами. У зв'язку з цим важливим завданням є знешкодження стоків металургійних заводів та заповнення ресурсів прісної води за рахунок очищення стічних вод. Незважаючи на широке впровадження оборотного водопостачання та нової маловідходної технології, кількість забруднених стічних вод металургійних виробництв залишається значною.

Поширеними компонентами промислових стоків є різні мінеральні речовини, наприклад солі кальцію, натрію, магнію. Вони утворюються або в результаті часто застосовуваних у металургійному виробництві реакцій нейтралізації, що йдуть за участю кислот і лугів, або при очищенні різних газів. Крім того, мінеральні забруднення надходять у стічні води при контакті рідин з різними продуктами, що містять солі у твердому стані або в розчині. Мінералізовані розчини утворюються також у системах знешкодження промислових стічних вод, що містять кислоти, луги та органічні сполуки.

У розроблених в даний час установках для очищення вод від цих речовин утворюються розчини та шлами, які у ряді випадків не можна скидати в природні джерела, а необхідно знешкоджувати. Зростання обсягів виробництва різних промислових товарів призводить до збільшення кількості мінералізованих стічних вод, що скидаються. При цьому підвищується концентрація солей у водоймах і грунті, чим завдається непоправна шкода природі. Тому проблема очищення високомінералізованих стічних вод повинна вирішуватися тільки з урахуванням утилізації розсолів, що утворюються.

Слід зазначити, що підземне поховання розсолів пов'язане з багатьма негативними наслідками, одні з яких спостерігаються вже зараз, інші можуть проявитися й у віддаленому майбутньому. Наприклад, внаслідок міграції

води підземних горизонтів та тектонічних змін земної кори розсоли можуть з'явитися у водозабірних свердловинах, розташованих далеко від місця їх закачування. Тому найкращим варіантом при очищенні високомінералізованих стічних вод буде отримання не висококонцентрованих розсолів, а твердих солей, що зручно і при транспортуванні і при похованні.

# 1 ЗАГАЛЬНА ЧАСТИНА

## 1.1 Характеристика високомінералізованих стічних вод

На підприємствах чорної металургії підвищення концентрації солей у воді відбувається за рахунок застосування розчинних речовин у металургійній технології та водопідготовці, вилуговування у водних процесах і упарювання в системах водопостачання. Основними джерелами утворення високомінералізованих стічних вод є водопідготовчі установки (ВПУ); парогенератори (продувні води); травильні відділення (промивні води після травлення та знежирення); гірничорудні підприємства (кар'єрні та шахтні води); локальні системи водопостачання (продувні води).

Перелічені джерела можна умовно зарахувати до джерел із контрольованим скиданням; крім них є неконтрольовані шляхи виведення солей із систем водопостачання – вітровий винесення, фільтрація з гідротехнічних споруд, виведення з вологою шлаків та шламів та інші. З контрольованим скиданням відводиться приблизно 80 % загальної кількості солей, що скидаються в цілому по галузі, і близько 60 % на заводах з повним металургійним циклом. Загальну характеристику мінералізованих стічних вод підприємств чорної металургії наведено в табл. 1.1.

### 1.1.1 Стічні води водопідготовчих установок та парогенераторів

На підприємствах чорної металургії для приготування добавочної води для парових та водогрійних котлів, котлів-утилізаторів, установок випарного охолодження, а також пом'якшеної та знесоленої води для технологічних потреб застосовуються ВПУ.

У чорній металургії найбільшого поширення набули ВПУ, що використовують Н-Na-катіонування та іонообмінне знесолення.

Таблиця 1.1 - Загальна характеристика мінералізованих стічних вод підприємств чорної металургії

| Тип стічної води, джерело виникнення | Кількість стоків на рік, млн. $м^3$ | Частка у загальному скиданні солей, % | Склад основних сольових компонентів |
|---|---|---|---|
| Регенераційні та відмийні води натрій-катіонітових фільтрів | 30 | 13,30 – 15,30 | NaCl, $CaCl_2$, $MgCl_3$ |
| Те ж саме, водень-катіонітових фільтрів | 2 | 0,56 – 0,58 | $CaSO_4$, $MgSO_4$, $Na_2SO_4$ |
| Те ж саме, іонообмінних знесолюючих установок | 3 | 1,10 – 1,15 | $CaSO_4$, $MgSO_4$, $Na_2SO_4$, NaCl, $Na_2SiO_3$ |
| Продувні води парогенераторів | 40 | 5,60 – 7,70 | $Na_2SO_4$, NaCl, $Na_2CO_3$, NaOH, $Na_2SiO_3$, $Na_3PO_4$ |
| Нейтралізовані промивні води після травлення металу | 25 | 5,20 – 5,40 | $CaSO_4$, $Na_2SO_4$, NaCl, $CaCl_2$, $Ca(NO_3)_2$, $NaNO_3$ |
| Промивні води після знежирення металу | 5 | 0,56 – 0,77 | $Na_2CO_3$, NaOH, $Na_3PO_4$, $Na_2SiO_3$ |
| Продувні води локальних систем водопостачання | 50 | 18,50 – 19,20 | $Na_2SO_4$, NaCl, $CaSO_4$, $Ca(HCO_3)_2$, $Mg(HCO_3)_2$ |
| Кар'єрні та шахтні води гірничорудних підприємств | 150 | 51,80 – 53,70 | NaCl, $Na_2SO_4$, $CaSO_4$, $MgSO_4$, $K_2SO_4$, $Ca(HCO_3)_2$, $Mg(HCO_3)_2$ |

При регенерації та відмиванні іонообмінних фільтрів ВПУ утворюються скидні води. Їх склад формується в результаті протікання обмінних реакцій між виснаженим завантаженням (катіонітом або аніонітом) та відповідною регенеруючою речовиною. Основними компонентами стічних

вод цього типу є речовини, що утворюються в результаті обмінних реакцій, а також надмірна кількість регенеруючої речовини. Наявність інших компонентів, присутніх зазвичай у вигляді домішок, визначається вмістом їх у регенеруючій речовині та воді, що використовуються для приготування регенераційного розчину та відмивання фільтрів.

Понад 90% пом'якшеної води на металургійних підприємствах готується на ВПУ з використанням Na-катіонування. Регенерація Na-катіонітових фільтрів проводиться розчином кухонної солі концентрацією 6 - 8%, відмивання фільтрів здійснюється освітленою після передочищення або пом'якшеною водою. Основними компонентами у складі стоків є хлориди натрію, кальцію та магнію. Відносна концентрація NaCl становить 71,2 – 84,2 %, $CaC1_2$ – 5,3 – 23,8 %, $MgCl_2$ – 3,1 – 9,4 %, інших домішок – 2,2 – 5,9 % загального вмісту солі, концентрація сульфату кальцію досягає 1,3 г/кг.

Найбільш поширеним реагентом для регенерації Н-катіонітових фільтрів є сірчана кислота. Нейтралізовані вапном кислі регенераційні та відмивальні води містять в основному сульфати кальцію, магнію та натрію, NaCl присутній у стоках у кількості, що відповідає його концентрації у відмивній воді. Загальний солевміст стічних вод цього типу становить 5 – 8 г/кг.

В установках іонообмінного знесолення утворюються кислі регенераційні та відмивальні води Н-катіонітових та лужні ОН-аніонітових фільтрів.

Основними споживачами пом'якшеної та знесоленої води є парогенератори. Процес генерації пари у яких супроводжується концентруванням підживлюючої води. Концентрація солей у котловій воді на допустимому рівні підтримується за рахунок відведення частини упареної води – продування.

Основними сольовими компонентами продувних вод є $Na_2SO_4$, NaCl, $Na_2CO_3$, NaOH, $Na_2SiO_3$, $Na_3PO_4$. Продувні води доцільно розділити на три групи: 1) продувні води парогенераторів, що підживлюються знесоленою

водою або конденсатом; 2) продувні води парогенераторів, до складу поживної води яких входить пом'якшена вода малої та середньої мінералізації або при великих ступенях упарювання додаткової води; 3) продувні води парогенераторів, до складу підживлюючої води яких входить пом'якшена вода з високою мінералізацією або при малих ступенях упарювання додаткової води.

Продувні води парогенераторів, віднесені до першої групи, характеризуються загальним, солевмістом до 0,4 г/кг, причому на частку лужних компонентів (NaOH, $Na_2CO_3$, $Na_3PO_4$) припадає від 30 до 100 % загального солевмісту. Стоки цієї групи не потребують спеціальної обробки та можуть бути використані для підживлення чи стабілізації систем водопостачання підприємств.

Продувні води котлів другої групи характеризуються загальним вмістом солі 1,1 – 10 г/кг (випарники і пароперетворювачі до 80 – 100 г/кг). Характерною особливістю стоків є відносно висока частка лужних компонентів (NaOH, $Na_2CO_3$), що досягає 33% загального солевмісту. Частка сульфату та хлориду натрію у сумі становить 67 – 73%. Силікат та фосфат натрію є домішками та їх максимальна частка становить відповідно 3,5 та 4,0 %.

Характерною особливістю продувних вод третьої групи є нижчий відносний вміст NaOH та $Na_2CO_3$, що становить у сумі до 5 – 6 % загального вмісту солі.

Основними компонентами цих водах є NaCl і $Na_2SO_4$, відносна частка яких у сумі сягає 92 – 97 %.

### 1.1.2 Стічні води травильних відділень

У чорній металургії для травлення виробів застосовують сірчану, соляну, азотну, фосфорну та плавикову кислоти. Широко поширене травлення у сірчаній кислоті з присадкою кухонної солі. При травленні

легованих сталей застосовують присадки селітри або травлення в суміші на основі сірчаної кислоти з додаванням азотної і соляної кислот або селітри і кухонної солі. Застосовуються також розчини азотно-солянокислі, сірчано-плавикові, азотно-плавикові та інші. При всій різноманітності складів, що використовуються для травлення поверхні металу, найбільш поширене травлення з використанням сірчаної кислоти.

В результаті промивання виробів після травлення утворюються промивні води, склад яких залежить від типу травильного розчину, технології промивки та якості вихідної води.

Для нейтралізації кислих промивних вод широко застосовується вапно. Поряд з перевагами цього реагенту, що полягають у можливості виведення із системи у вигляді осаду основної частки приросту сульфат-іону та іонів металів та відносно низької вартості, він характеризується істотним недоліком – здатністю утворювати пересичені розчини сульфату кальцію.

Під час організації замкнутих систем водопостачання травильних відділень виникає необхідність повторного використання промивних вод. Фізико-хімічні показники оборотної води повинні забезпечувати необхідну якість промивання виробів, а також запобігання відкладень.

Кількість продувних вод визначається у кожному конкретному випадку з умов підтримки нормованої якості оборотної води. З урахуванням особливостей складу нейтралізованих промивних вод їх доцільно поділити на три групи.

1) Нейтралізовані промивні води, що утворюються при травленні виробів у соляній, азотній кислотах та їх сумішах, а також при нейтралізації промивних кислих вод содою або лугом. У складі стоків цього типу є добре розчинні солі $CaCl_2$, $Ca(NO_3)_2$, $Na_2SO_4$, NaCl, $NaNO_3$.

2) Нейтралізовані промивні води, що утворюються при травленні виробів з використанням сірчаної кислоти, загальний вміст солі не перевищує 5 – 6 г/кг, у тому числі концентрація сульфату кальцію становить 2,0 – 2,5 г/кг.

При видаленні зі стоків $CaSO_4$ вони можуть бути використані в ряді випадків повторно.

3. Нейтралізовані промивні води, що утворюються при травленні виробів з використанням сірчаної кислоти, загальний вміст солі понад 6 г/кг. При обробці стоків цього типу необхідно видаляти не тільки $CaSO_4$, але й інші солі (NaCl, $Na_2SO_4$, $CaC1_2$, $NaNO_3$ та інші).

Поряд із нейтралізованими кислими промивними водами у травильних відділеннях утворюються лужні промивні води після знежирення поверхні металу. Стоки цього типу містять неорганічні миючі речовини ($Na_2CO_3$, NaOH, $Na_3PO_4$), а також $Na_2SiO_3$, олії, ПАР, механічні домішки. Концентрація неорганічних миючих речовин становить від 2,0 до 4,0 г/кг.

### 1.1.3 Стічні води локальних систем водопостачання

Локальні системи оборотного водопостачання є основними структурними ланками водозабезпечення металургійних заводів. Вони характеризуються автономністю водопостачання, та обмеженими кількісними та якісними зв'язками з іншими системами. До складу локальних систем входять засоби транспортування води (насосні станції та трубопроводи), комплекс споруд для очищення та стабілізаційної обробки води, водоохолоджувачі (градирні, бризкальні басейни, ставки), акумулюючі ємності та водонапірні вежі, а також споруди підготовки до утилізації вилучених з води відходів (залізовмісних шламів, шлаків-нафтопродуктів, мінеральних солей) або їх складування. За характером використання та забруднення води системи оборотного водопостачання класифікуються на системи умовно чистої води та системи забрудненої води.

У системах умовно чистої води вода використовується як холодоагент у поверхневих теплообмінниках і в процесі використання лише нагрівається. До них відносяться системи водопостачання енергетичних виробництв (теплові та паровоздуходувні станції, кисневі блоки) та металургійних

виробництв (охолодження доменних, мартенівських нагрівальних печей, повітро-маслоохолоджувачів, газових трактів кисневих конвертерів).

У локальних системах забруднена вода контактує безпосередньо з оброблюваними матеріалами, забруднюється механічними та хімічними домішками та, як правило, нагрівається. До цих систем належать системи водопостачання мокрих газоочисток металургійних печей та аглофабрик, охолодження чушкового чавуну, гідротранспорту пилу, грануляції металургійних шлаків, охолодження обладнання станів гарячої прокатки, термічного зміцнення, вторинного охолодження заготовок безперервного лиття.

Засолонення систем умовно чистої води обумовлюється упарюванням, систем забрудненої води – упарюванням і вилуговуванням розчинних речовин у процесі контакту води з продуктами, що охолоджуються і очищаються. Підвищення вмісту солі можливе і в результаті введення хімічних реагентів у процесі кондиціювання води (підкислення, нейтралізація, коагулювання).

У локальних системах з об'ємом оборотного водопостачання 80 – 90 %, що використовують свіжу воду з солевмістом не більше 2 г/кг, загальний солевміст та концентрація, сульфат-іонів не перевищують нормованих значень, вміст гідрокарбонатів значно вищий за допустимі концентрації. Застосування в цих режимах водокористування свіжої води карбонатно-сульфатного класу з сумарним вмістом солі до 3 г/кг веде до перевищення нормативних вимог по концентрації гідрокарбонатів і сульфатів.

При безстічному водопостачанні та використанні свіжої води із загальним вмістом солі 2 г/кг не задовольняються нормативні вимоги в локальних системах чистої води – за вмістом гідрокарбонатів; у системах грануляції шлаку – за концентрацією сульфат-іону та гідрокарбонатів; у системах мокрих газоочисток металургійних печей – за всіма показниками сольового складу.

У системах безстічного водопостачання умовно чистої води достатньо пом'якшення свіжої води із загальним солевмістом менше 3 г/кг до концентрації $HCO_3^-$ на рівні 0,048 – 0,061 г/кг (0,8 – 1,0 мг·екв/кг) без зниження концентрації інших компонентів.

У системах безстічного водопостачання газоочисток металургійних печей, що використовують свіжу воду з солевмістом більше 0,5 г/кг, і грануляції металургійних шлаків, що використовують свіжу воду з солевмістом більше 2 г/кг, необхідна демінералізація оборотної води за основними показниками сольового складу (сульфатам, гідрокарбонатам, хлоридам).

Крім оборотної води локальних систем на заводах формуються стічні води атмосферних опадів – поверхневий стік. Воду поверхневого стоку можна використовувати у системах оборотного водопостачання без знесолення [1].

## 1.2 Існуючі методи знешкодження високомінералізованих стічних вод

Очищення високомінералізованих стічних вод до стану, придатного як для технологічного, так і для побутового використання, прийнято називати знесоленням. Знесолення стічної води може бути здійснене шляхом вилучення власне молекул води з розчину, або видаленням іонів солей. Енергетичні витрати у другому випадку у багато разів більші, ніж у першому, хоча теоретично вилучення солей має бути менш енергоємним.

В даний час відома велика кількість способів виділення солей із розчину. Залежно від властивостей та фізико-хімічного складу стічних вод застосовуються різні методи їх знешкодження:

- механічні – виділення механічних домішок шляхом фільтрування (через пісок, гравій, кокс тощо) та відстоювання (простого та із застосуванням хімічних реагентів для прискорення осадження суспензій);

- хімічні – вилучення з води шкідливих компонентів за відповідних хімічних реакцій (реагентні методи);

- фізичні – поділ молекул солей і води внаслідок дії фізичних сил (зворотний осмос, електродіаліз, термічне знесолення, геліоопріснення, кріоопріснення та ін.);

- фізико-хімічні – екстракція різними розчинниками, іонний обмін, поглинання шкідливих компонентів сорбентами (активоване вугілля, силікагель та ін.);

- біохімічні – використання життєдіяльності бактерій та інших найпростіших організмів, що засвоюють шкідливі компоненти, та ін. (біологічне очищення в біопрудах та в біоінженерних спорудах).

Для зручності аналізу методи демінералізації (знесолення) розбиті на чотири групи [2].

До першої групи належать такі методи як знесолення зворотним осмосом, термічне знесолення та іонний обмін, що отримали останнім часом широкий розвиток.

До другої групи належать такі методи як електродіаліз, геліоопріснення та реагентні способи опріснення.

До третьої групи належать методи, які поки що мало використовуються для знешкодження високомінералізованих стічних вод: це біологічне очищення в біологічних ставках і біоінженерних спорудах, кріоопріснення, фільтрація через грунт, торф, штучні суміші.

Методи, що належать до четвертої групи, застосовуються епізодично і, загалом, не придатні для цілей демінералізації та очищення великих об'ємів води: це електрокоагуляція, вакуумування та центрифугування.

Однак наявні методи очищення стічних вод у багатьох випадках недостатньо ефективні або зовсім непридатні. Метод знешкодження стічних вод може вважатися задовільним, якщо він забезпечує зниження концентрації шкідливих речовин до значень, менших гранично допустимих, і дозволяє отримувати високі кінцеві концентрації розчинів. Жоден із зазначених

методів не відповідає повністю пред'явленим вимогам. Так, мінералізовані води в більшості випадків не можуть знешкоджуватись механічними та біохімічними методами. Фізико-хімічні методи дають можливість знесолювати стічні води, проте ступінь концентрування розчинів при цьому обмежена. Зі збільшенням останньої суттєво зростають витрати енергії.

Велика різноманітність сольового складу стічних вод і відмінність у потужності та цільовому призначенні знешкоджувальних установок не дозволяють вибрати будь-який один універсальний метод очищення, який можна було б застосувати з максимальною економічною ефективністю практично в будь-яких умовах [3].

**Знесолювання методом зворотного осмосу, термічне знесолення, іонний обмін.** Зворотний осмос є найпоширенішим методом знесолення високомінералізованих вод.

Метод опріснення зворотним осмосом заснований на фільтруванні солоної води через напівпроникні мембрани, що пропускають воду, але затримують гідратовані іони розчинених солей. Процес перенесення води через напівпроникну мембрану здійснюється в напрямку, протилежному осмотичному перенесенню, при тиску, що перевищує осмотичний. Цей метод застосовується для знесолення вод із вмістом солі до 40 г/л [4].

Залежно від типу зворотньоосмотичні мембрани забезпечують солезатримання від 90,0 до 99,5%. При вилученні від 40 до 75% прісної води та продуктивності мембран 2,1 – 3,6 $м^3$/добу забезпечується затримання 95,4% $Cl^-$, 95% $Na^+$, 92% $Mg^{2+}$, 95% $SO_4^{2-}$, 85 – 74% $K^+$ [5].

До переваг зворотного осмосу в порівнянні з іншими методами поділу можна віднести:

1) Теоретично високий коефіцієнт корисної дії, так як відсутність фазової рівноваги при зворотному осмосі зберігає енергію, яка витрачається лише на подолання втрат на тертя розчину, що протікає через апарат, на перенесення фільтрату через мембрану та на термодинамічну роботу виділення речовини.

2) Можливість використання мембранної фільтрації для поділу багатокомпонентних систем.

3) Зворотний осмос забезпечує очищення до рівня необхідного солевмісту, а застосування робочої схеми кількох паралельно працюючих зворотньоосмотичних модульних установок може забезпечити необхідну продуктивність.

Слід також враховувати такі недоліки роботи схем зворотньоосмотичних установок:

1) 20 – 30 % води припадає на концентровану (розсіл), утилізація якої потребує додаткових витрат, а в деяких випадках утилізація неможлива;

2) при паралельно працюючих зворотньоосмотичних установках можливе збільшення енерговитрат на створення високих напорів у кожній установці;

3) постійне підкислення води, яке потрібне для витримування робочих параметрів очищення та застосування у зв'язку з цим спеціального кислотостійкого обладнання, швидке зношування кислотостійких труб та арматури можуть призвести до додаткового подорожчання всього блоку очищення в цілому [6].

Хоча ще зовсім недавно термічне знесолення вважалося безперспективним напрямом для наукових досліджень через його енергоємність, проте простота експлуатації установок за умови використання викидної енергії, наприклад, теплоелектростанцій, АЕС та металургійних агрегатів, зумовила вдосконалення та здешевлення зазначеного способу, відкривши перед ним нові можливості. Цей метод знесолення є найпоширенішим методом знесолення та застосовується у всіх країнах світу. Застосування даного методу доцільно на великих установках при мінералізації вихідної води більше 1,5% для знесолення води будь-якого складу [7].

У нашій країні і за кордоном розроблено багато типів опріснювальних установок, розрахованих різну продуктивність (від 400 до 11 тис. $м^3$/доб.) [5].

Накопичений досвід та знання в галузі знесолення високомінералізованих вод термічним методом дозволяють будувати багатокорпусні випарники практично будь-якої продуктивності.

До переваг схем очищення високомінералізованих стічних вод з використанням термічного методу слід віднести:

1) високий ступінь розробленості обладнання та тривалий досвід його експлуатації;

2) високий ступінь знесолювання води, що знешкоджується, і в деяких випадках отримання не розсолів, які вимагають додаткової обробки, а солей у твердому вигляді.

До недоліків цих схем знесолення належать:

1) висока енергоємність;

2) підвищені вимоги до матеріалів обладнання;

3) часткова необхідність додаткової хімічної обробки води з метою зниження утворення накипу.

Широке поширення для пом'якшення та знесолення природної води набув метод іонного обміну. Для знесолення метод застосовується переважно з використанням солонуватих вод із загальним солевмістом до 2 – 3 г/л.

Метод опріснення води іонним обміном заснований на застосуванні спеціально виготовлених зернистих матеріалів – катіонітів та аніонітів, що сорбують з оброблюваної води катіони та аніони розчинених солей.

Катіоніти – практично нерозчинні у воді матеріали, що являють собою солі або кислоти з нерозчинним твердим аніоном; катіон здатний вступати в певних умовах в обмінну реакцію з катіонами розчину, в якому знаходиться катіоніт. В результаті цієї реакції катіоніт сорбує з розчину катіони, замінюючи їх на еквівалентну кількість катіонів, якими катіоніт був попередньо заряджений.

Аніоніти являють собою основи або солі з твердим нерозчинним катіоном. Аніони аніоніту здатні обмінюватися на аніони розчину, заміщаючи їх еквівалентною кількістю аніонів, якими аніоніт був попередньо

заряджений [8].

Процеси очищення іонообмінним методом відпрацьовуються на виробничих стічних водах багатьох виробництв. Продуктивність комплексу дослідних установок – 25 – 50 $м^3$/год, або 600 – 1200 $м^3$/добу. Процес складається з п'яти ступенів механічного очищення (усереднення, нейтралізація, фільтрація на кварцових фільтрах, флотація, фільтрація на волокнистому фільтрі) та п'яти ступенів іонообмінного очищення (очищення від іонів $Zn^{2+}$, $Ca^{2+}$, $Mg^{2+}$, $Fe^{3+}$) [5].

До переваг методу можна віднести:

1) високий ступінь вибірковості вилучення речовин із стічної води на молекулярному рівні;

2) перспективність у сфері подальшої утилізації вилучених речовин;

3) при правильному доборі іонітів можна досягти практично повного видалення заданих елементів, а знесолення загалом довести до рівня бідистильованої води.

Необхідно враховувати такі негативні моменти роботи іонообмінних установок:

1) наявність додаткових обсягів регенераційних вод;

2) складність схеми інженерних комунікацій;

3) висока вартість іонообмінних смол;

4) наявність розсолів, які потребують подальшої обробки.

**Електродіаліз, геліоопріснення та реагентні методи опріснення.** Сутність методу електродіалізу полягає в тому, що при пропусканні постійного електричного струму через розчин і через межу фаз «електрод-електроліт» або «електрод-електроліт-мембрана» відбувається процес сепарації іонів солей та відповідний поділ розчину, тобто процес знешкодження. Електродіаліз набув широкого практичного поширення, проте область його застосування обмежується опрісненням води з концентрацією солей у діапазоні 1,5...15 г/л.

Основними перевагами електродіалізу перед іонним обміном, який у

ряді випадків може вирішувати ті самі завдання, є:

1) відмова від споживання хімічних реактивів для регенерації;

2) застосування електрики.

До недоліків електродіалізу відносяться:

1) мала інтенсивність, громіздкість, відсутність мембран, що витримують тривалу експлуатацію із задовільною якістю роботи;

2) закладене у технологічну схему самого процесу електродіалізу підкислення вимагає додаткової обробки води після її очищення;

3) вимога до очищаємої води передбачає наявність попереднього очищення, як від зважених речовин, так і від інших компонентів, що позначається на вартості очищення води і ускладнює схему комунікацій та, як наслідок, створює певні труднощі при експлуатації знесолюючих систем такого типу;

4) після процесу знешкодження залишаються висококонцентровані розсоли, які у ряді випадків не підлягають утилізації [9].

Сутність методу геліоопріснення полягає в основному в конденсуванні вологи, що знаходиться в атмосферному повітрі, або випаровується зі стічних вод за допомогою природної сонячної радіації. До цього методу відноситься використання механічної енергії вітру для перетворення в електричну, яка потім використовується в традиційних методах знесолення. Сонячні промені, що падають на прозоре покриття установки, лише частково відбиваються від поверхні, а основна частина променів проникає в порожнину установки та поглинається пароповітряною сумішшю та водою. Оскільки пароповітряна суміш і рідина є абсолютно прозорими субстанціями, відбувається інтенсивне поглинання сонячної радіації. При будь-яких режимах роботи температурний напір, що визначає процес конденсації парів рідини, виникає між пароповітряною сумішшю, що заповнює верхню частину демінералізатора та прозорою поверхнею конденсації. Підвищення солевмісту очисної води в межах 3 – 40 г/л практично не надає помітного впливу на продуктивність сонячних опріснювачів, оскільки кількість тепла,

необхідна для нагрівання та випаровування розчинів таких концентрацій, практично не залежить від вмісту солей. Демінералізатори такого типу в літній та осінній періоди забезпечували одержання понад 5 л дистильованої води на 1 м$^2$ поверхні заскління при коефіцієнті корисної дії близько 55 %.

Однак можна зробити висновки, що застосування сонячних опріснювачів доцільно за високої сонячної радіації та відсутності теплової енергії, а також нестабільність надходження первинної енергії (сонця та вітру) створює додаткові труднощі при використанні даного методу знешкодження [9].

При реагентних методах опріснення у воду вводять речовини, звані реагентами, які, взаємодіючи з іонами солей, що знаходяться в ній, утворюють нерозчинні, випадаючі в осад речовини. Внаслідок того, що мінералізована стічна вода містить велику кількість розчинених речовин, витрата реагентів дуже значна і становить приблизно 3-5% кількості опрісненої води.

Усі методи другої групи, будучи теоретично перспективними, не знаходять широкого застосування через недосконаліть, не розробленість, високу вартість. У силу перерахованих вище недоліків в даний час поширення методів знесолення, включених до другої групи, передчасно, так як ці методи вимагають ретельного доопрацювання.

**Біологічне очищення в біопрудах та біоінженерних спорудах, кріоопріснення, фільтрація через ґрунт, торф, штучні суміші.** До третьої групи належать методи, які поки що мало використовуються для знешкодження високомінералізованих стічних вод: це біологічне очищення в біологічних ставках і біоінженерних спорудах, кріоопріснення, фільтрація через грунт, торф, штучні суміші. Ці методи відрізняються малими енерговитратами та економічністю (за винятком кріометодів).

Сутність способу очищення стічних вод у біологічних ставках полягає в покращенні якості води за основними показниками за рахунок окислення органічних домішок у процесі життєдіяльності бактеріального комплексу та

засвоєння продуктів розпаду в процесі фотосинтезу мікроводорстями та вищими водними рослинами. Домішки неорганічного походження також піддаються різного ступеня деструкції під впливом біологічних співтовариств. Основним недоліком даного способу є незначне зниження мінералізації (на 6,2%) при максимальному солевмісті до 12 г/л, тому для знешкодження високомінералізованих стічних вод цей метод не прийнятний [2].

Сутність методу кріоопреснення полягає в заморожуванні стічних вод, внаслідок чого виходить чиста вода у вигляді кристалів льоду та розсіл. Опріснювальні установки, що працюють за методом багатоступеневого виморожування (США), мають продуктивність від 50 до 30 тис. $м^3$/добу [5].

Кріометоди не отримали широкого застосування через дефіцит та високу вартість джерел постачання холоду, невисокого коефіцієнта використання споживаної енергії холоду та дуже високої вартості очищення. Також при застосуванні кріоопріснення необхідно враховувати, що воно супроводжується вторинним забрудненням у вигляді висококонцентрованих розсолів, що потребують додаткових витрат на утилізацію.

**Електрокоагуляція, вакуумування та центрифугування.** Методи, що належать до четвертої групи, застосовуються епізодично і, загалом, не придатні для цілей демінералізації та очищення великих обсягів води. Ці методи дають високий ступінь очищення, але вимагають виключно складної попередньої обробки води, що знешкоджується. Крім того, поки що не розроблені задовільно працюючі установки. Електрокоагуляція, вакуумування та центрифугування вимагають створення високих напорів в апаратах очищення, що ускладнює експлуатацію та збільшує енерговитрати.

З розглянутих вище методах знешкодження високомінералізованих стічних вод можна зробити висновок, що найбільш перспективним та ефективним методом знешкодження високомінералізованих стічних вод є метод термічного знесолення, оскільки використання інших методів, як правило, пов'язане з необхідністю вирішення низки проблем. Для методів

зворотнього осмосу та електродіалізу це високі енерговитрати, необхідність попередньої водопідготовки (очищення від завислих речовин тощо) та утилізація висококонцентрованих розсолів; для методів іонного обміну – необхідність водопідготовки та висока вартість сорбентів, для кріоопріснення – висока вартість холодоагентів та необхідність утилізації висококонцентрованих розсолів; для реагентних методів – необхідність відчудження великих площ земель та утилізації опадів; для геліоопріснення – обмеженість застосування зон з аридними умовами.

## 1.3 Характеристика випарних установок для знешкодження високомінералізованих стічних вод

Випарювання – це процес концентрування розчинів твердих нелетких речовин шляхом часткового випаровування розчинника під час кипіння рідини. Випарювання застосовують для концентрування розчинів нелетких речовин, виділення з розчинів чистого розчинника (дистиляція) та кристалізації розчинених речовин, тобто нелетких речовин у твердому вигляді.

Процес випарювання проводиться у випарних апаратах. Випарні апарати можуть класифікуватись: за належністю до певної галузі промисловості; за призначенням (концентратори та випарники); конструктивним ознакам; принципу роботи (періодичної чи безперервної дії); застосовуваних матеріалів (металеві та неметалічні); виду первинного теплоносія та ін. Випарні апарати різняться (рис. 1.1).

1. За принципом дії – на апарати періодичної та безперервної дії. Перші мають низку переваг перед іншими: при тих самих початковій і кінцевій концентраціях розчину у них досягаються вищі коефіцієнти теплопередачі; полегшується перекачування концентрованого в'язкого розчину, оскільки її можна здійснити після закінчення циклу концентрування при атмосферному або підвищеному тиску.




Рисунок 1.1 – Класифікація випарних апаратів

Установки періодичної дії можуть використовуватися лише за невеликих витрат стічної води. Однак для високих продуктивностей необхідні установки безперервної дії, які в більшості випадків ефективніші.

2. По первинному використовуваному теплоносію на апарати з паровим, газовим (продукти згоряння, гаряче повітря та ін.), рідинним (вода, олія, гідрофобний теплоносій та ін.), а також електричним обігрівом. У промисловій практиці найчастіше застосовують паровий обігрів, що забезпечує високе значення коефіцієнта тепловіддачі поряд із зручністю регулювання теплового навантаження апарату. В установках очищення стічних вод широкого поширення набув газовий теплоносій з огляду на можливість його використання для безпосереднього контактного нагріву розчинів без передачі тепла через поверхню нагріву. У ряді випадків доцільна утилізація тепла відходящих газів різних технологічних агрегатів для цілей знешкодження мінералізованих вод.

3. По суміщенню стадій нагріву та пароутворення – на апарати, в яких зони нагріву та пароутворення поєднані; апарати із винесеною зоною пароутворення або поверхнею нагріву. Останні два типи апаратів застосовують зниження відкладень на поверхні нагріву.

4. За рухливістю поверхні нагріву – на апарати з нерухомою та рухомою поверхнею нагріву, застосування якої викликане прагненням інтенсифікувати процес теплообміну. Рухливість поверхні нагріву забезпечується обертанням, вібрацією. У таких апаратах швидкість руху рідини відносно поверхні нагріву висока, внаслідок чого суттєво підвищується інтенсивність теплообміну, відкладення (інкрустація) зменшуються або повністю запобігаються. При цьому суттєво підвищується ступінь концентрування розчинів.

5. За способом організації руху розчину – на апарати з природною та примусовою циркуляцією, одноразовою та багаторазовою. Природна циркуляція може здійснюватися в об'ємі апарату, а також забезпечуватися

спеціальними циркуляційними трубами. Примусова циркуляція організовується за допомогою насосів, мішалок або вдування пари (газу). Додаткове переміщення розчину (циркуляція) може створюватися також при обертанні або при низькочастотних вібраціях поверхні нагріву.

6. За розташуванням зони випаровування – на апарати, у яких випаровування розчину відбувається усередині труб чи об'ємі апарата. Рідина може бути всередині або зовні поверхні нагріву.

7. За ступенем заповнення перерізу труб – на апарати із заповненим та незаповненим перерізом труб. До останніх відносяться апарати зі вставками та плівкові. Плівкові випарні апарати отримують в даний час все ширше поширення завдяки тому, що вони мають високу інтенсивність теплообміну при малих температурних напорах. За способом руху плівки такі апарати поділяються на апарати з спадаючою, висхідною плівкою і плівкою, що рухається під дією відцентрових сил.

8. У напрямку руху пари і рідини – на апарати, у яких рідина рухається знизу нагору чи згори донизу. Апарати з спадаючою плівкою поділяються також по напрямку руху вторинної пари – вгору чи вниз. Останній спосіб сприятливо позначається на режимі теплообміну, оскільки рух пари та плівки в одному напрямку сприяє збільшенню швидкості плівки та її турбулізації.

9. По орієнтації поверхні нагріву - на апарати, у яких поверхні нагріву можуть розташовуватися вертикально, горизонтально або похило.

Одним із основних недоліків випарних апаратів є інтенсивні відкладення солей на поверхнях нагріву, що знижують економічність та надійність роботи установок [3].

Останніми роками, поряд з розробкою методів попередньої обробки висхідної води (крейдові затравки, хімічна підготовка, термопом'якшення, содовапнякування, десульфатизація тощо), що зменшують інтенсивність відкладень, розвиваються методи безповерхневої передачі тепла розчину. Це досягається в установках із контактними апаратами.

Нижче наведено один із можливих варіантів класифікації установок концентрування мінералізованих вод без відкладень на поверхнях нагріву, оснащених контактними теплообмінниками (рис. 1.2).




Рисунок 1.2 – Класифікація випарних установок, у яких відсутній контакт розчину з поверхнею нагрівання

Контактні випарні апарати можна класифікувати за типом основного теплоносія (газ, рідина, тверді частинки), за способом підведення тепла (з внутрішнім і зовнішнім джерелами), за напрямом зміни температури

основного теплоносія та рідини, що випаровується (охолодження, нагрівання), за конструктивним виконанням (барботажні, порожнисті розпилювальні, тарілчасті, поличкові, з псевдозрідженою насадкою, із зустрічними струменями, механічні та ін.) [8].

Зокрема, ці установки можна розділити на одноступінчасті та багатоступінчасті (регенеративні).

До одноступеневих випарних установок належать:

1. Установки, в яких випаровування здійснюється безпосередньо у нагрівальний теплоносій, а пари, що утворюються, виносяться з ним (скрубери, сушильні агрегати, печі, апарати занурювального горіння).

2. Установки, в яких розчин у контактному апараті нагрівається, після чого спрямовується на ступінь адіабатного випаровування.

3. Установки, у яких випарювання здійснюється на проміжному теплоносії.

В установках першого типу можна конденсувати водяні пари з парогазової суміші та отримувати прісну воду. Однак поверхня нагріву в цьому випадку надзвичайно велика через низьку інтенсивність процесу конденсації пари з парогазової суміші. Якщо випаровування відбувається в адіабатній ступені, також отримують дистилят, але при цьому зменшуються габарити контактного апарату, оскільки об'ємна витрата парогазової суміші значно менша, ніж у першому випадку.

Частина концентрованого розчину, отриманого на цих установках, насосом направляється на рециркуляцію, а частина виводиться з установки. Тепло дистиляту можна використовувати для теплофікації та гарячого водопостачання.

Недопущення відкладень на поверхнях нагріву установки дозволяє підвищити концентрацію розчину до максимально можливого за умов надійного транспортування розчину або суспензії.

Основним недоліком одноступеневих апаратів є велика питома витрата тепла, яка становить 2800 – 8000 кДж/кг випареної води.

У багатоступінчастих випарних установках відсутність відкладень на поверхнях нагріву та високі енергетичні показники досягаються контактним підігрівом розчину і подальшим його упарюванням у багатоступінчастих адіабатних випарниках, в яких конденсація здійснюється в поверхневих конденсаторах за допомогою прісної води або іншого теплоносія, що не утворює відкладень на поверхнях нагріву.

У багатоступінчастих випарних установках питома витрата тепла на концентрування значно зменшується і становить, залежно від параметрів установки, 1000-1500 кДж/кг [7].

## 1.4 Особливості термічного знешкодження високомінералізованих стічних вод у випарних установках

В даний час створено велику кількість різних типів установок для очищення високомінералізованих стічних вод, що відрізняються один від одного організацією процесу кипіння, тиском, при якому відбувається процес дистиляції, регенерацією тепла, кратністю випаровування води, що очищається, зв'язком з циклом енергетичної установки, конструктивним виконанням і рядом інших ознак.

Можна виділити три методи випарювання розчинів:

1. Пароутворення на поверхні теплообміну.

2. Адіабатне випаровування.

3. Випаровування при контакті з теплоносієм.

З метою економічності в одній дистиляційній установці застосовують, зазвичай, кілька дистиляційних апаратів.

При виборі типу та конструкції опріснювальної установки необхідно враховувати всі фактори, що впливають на техніко-економічні показники. У зв'язку з цим вона повинна [2]:

1) забезпечувати отримання максимально концентрованих розсолів або в ідеальному випадку забезпечувати отримання солей, що видобуваються, у

твердому вигляді;

2) мати максимальну економічну ефективність;

3) допускати можливість повної автоматизації;

4) мати просту конструкцію, малі габарити та прийнятну вартість;

5) характеризуватись низькою інтенсивністю накипеутворення або відсутністю його негативного впливу на перебіг технологічного процесу;

6) забезпечувати високу надійність роботи.

Усі існуючі способи термічного знесолення характеризуються загальними недоліками: утворенням накипу та корозією теплообмінних апаратів.

Одна із спроб підвищення ефективності знешкодження концентрованих розчинів пов'язана зі створенням багатоступінчастих установок, в яких розчин нагрівається або випаровується при контакті з гідрофобними теплоносіями [9]. Проблема накипу не виникає в таких безповерхневих випарних установках, так як теплопередача в них відбувається при безпосередньому контакті нагрітого теплоносія та води, що очищається.

В даний час вивчається ряд установок з гідрофобним теплоносієм:

1) Установки, в яких конденсація парів, що утворюються при випаровуванні, здійснюється в конденсаторах, що охолоджуються потоком прісної води, тепло якої передається за допомогою гідрофобного теплоносія потоку рідини. Такі установки запропоновані П. Томасом [7].

2) Установки, в яких конденсація парів, що утворюються при випаровуванні, здійснюється на струменях конденсату, тепло якого потім передається за допомогою гідрофобного теплоносія потоку мінералізованої води. Такі установки запропоновані Д. Отмером [5]; вони також описані у роботі [9].

3) Установки з рециркулюючим потоком теплоносія, запропоновані Є.Д. Мальцевим, С. Вилке та ін [3].

4) Установки прямоточного контактного випарювання.

Установки з гідрофобним теплоносієм характеризуються відсутністю

відкладень на поверхні нагріву, зменшенням корозії обладнання, зниженням капітальних витрат, а також можливістю збільшення температурного напору, що сприяє підвищенню енергетичної ефективності та економічності процесу випаровування.

Основні вимоги до гідрофобного теплоносія:

а) повна нерозчинність та легкий поділ з водою за відсутності емульсії;

б) відсутність сорбційної здатності по відношенню до солей, розчинених у знешкоджуваній воді;

в) термічна стійкість у діапазоні температур 230 – 530 ºС;

г) висока теплоємність та невелика в'язкість;

д) доступність та низька вартість.

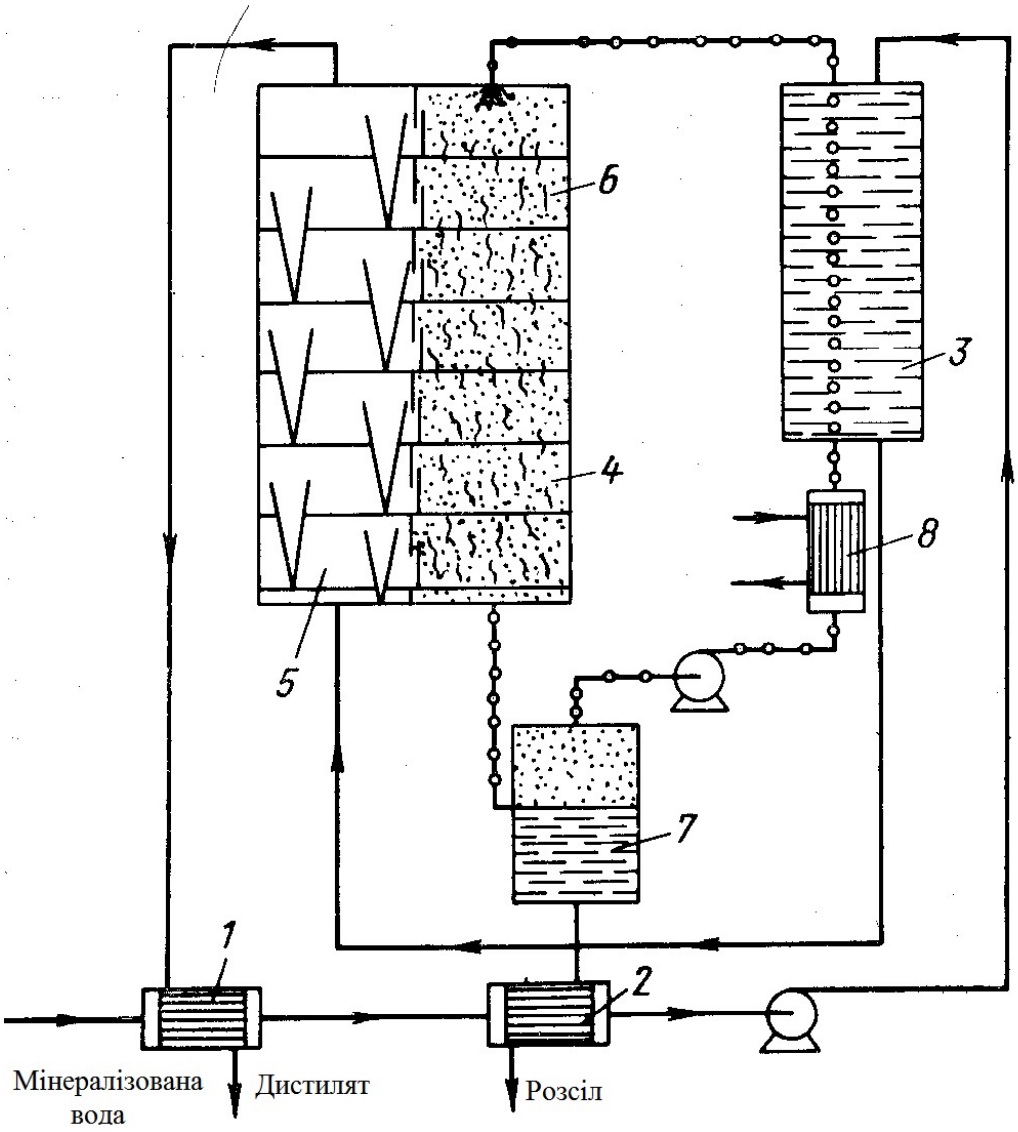
В якості рідких гідрофобних теплоносіїв можна використовувати парафін, мінеральні масла, силікони та ін. Також можна використовувати газоподібні речовини - повітря, димові гази, і тверді речовини.

Сутність цього способу знесолення полягає у наступному. Гідрофобний теплоносій, що являє собою інертне по відношенню до води і розчинним у ній солям речовина, попередньо нагрівається теплом власного дистиляту установки, відокремлюється від нього і вприскується у воду, що очищається. Теплоносій віддає отримане тепло на нагрівання та випаровування солоної води. Охолоджений гідрофобний теплоносій відокремлюється від розсолу і знову повертається до циклу знесолення.

Як гріючий агент в гідрофобних випарниках широко використовується масло. Схема установки з масляним теплоносієм показана рисунку 1.3 [2].

Вода, що знешкоджується, нагріта в поверхневих підігрівачах 1 і 2, подається в змішувальний підігрівач 3, де вона додатково нагрівається в результаті безпосереднього контакту з гарячим маслом. Вода потім надходить у нижню частину випарника 4, що складається з випарної камери 5 і конденсаційної камери 6. За рахунок розрідження, створюваного в секціях випарної камери, вода випаровується, а її частина, що залишилася, видаляється в підігрівач 1 для нагрівання початкової води. Пара з випарної

камери перетікає в конденсаційну, де охолоджується холодною олією, що надходить із змішувального підігрівача. Суміш прісної води та олії надходить у сепаратор 7 на поділ. З сепаратора масло відводиться в підігрівач 8, а потім йде на нагрівання води, що очищається.




1, 2 – поверхні підігрівача; 3 – змішувальний підігрівач; 4 – нижня частина випарника; 5 – випарна камера; 6 – конденсаційна камера; 7 – сепаратор; 8 – підігрівач

Рисунок 1.3 – Схема гідрофобної опріснювальної установки з масляним теплоносієм

Конденсат через підігрівач 2 відводиться до споживачів. В якості гідрофобних теплоносіїв можливе використання рідких вуглеводнів,

наприклад гасу, октану та ін.

Охолоджений у випарнику розплав до 340 °С, що містить викристалізовані солі, піддається в гідроциклоні поділу, знову нагрівається і надходить на випарник. Солі, що відокремилися, йдуть на переробку. При використанні суміші з 66% NaOH і 34% солей випаровуваної води продуктивність установки становить 3800 $м^3$/добу при швидкості суміші, що надходить у випарник, 3 м/сек. В якості компонентів розплаву використовуються хлориди, броміди, йодиди та гідроокиси лужних металів.

Незважаючи на певну перспективність, установки з рідким гідрофобним теплоносієм мають такі недоліки [3]:

1) Необхідність використання великої кількості гідрофобної рідини (органічні теплоносії, парафін тощо), що потребує збільшення масштабів виробництва цих теплоносіїв та ускладнюється експлуатація промислових установок.

2) Складність сепарації теплоносія від розчину, що спричиняє ускладнення обладнання установки.

3) Ускладнена сепарація кристалів солей та інших твердих частинок від в'язкого теплоносія, внаслідок чого він засмічується.

4) Великі втрати температурного напору та низька термодинамічна ефективність. При температурному напорі 80 – 100 °С температурні втрати на 20 – 30 °С підвищують витрату енергії на знесолення не менше ніж на 25 – 30 %.

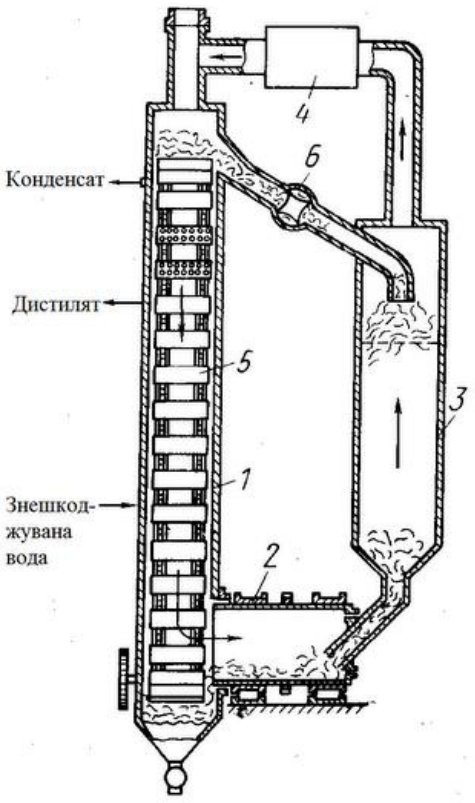
5) Низька інтенсивність теплообміну внаслідок малих відносних швидкостей руху рідини (до 0,15 м/с) та низької теплопровідності гідрофобного теплоносія ($\lambda$ = 0,125 – 0,14 Вт/мК).

6) Великі втрати на перекачування гідрофобного теплоносія, що пов'язано з підвищеною питомою витратою гідрофобного теплоносія.

Для усунення цих недоліків в якості проміжного теплоносія доцільно використовувати тверді частинки, наприклад мінеральні або металеві [2, 6].

Витрати енергії у цих установках у майбутньому можуть становити близько 550 кДж/кг випареної води [2].

Відомі різні установки випарювання розчинів із застосуванням твердого теплоносія. С. Томас запропонував використовувати як теплоносій порошок солі [2]. Знесолювана вода, з температурою 50-90 ºС, подається на вертикальну колону, в яку вводиться нагрітий до 500-650 ºС порошок солі з розміром частинок 0,01-1 мм. Співвідношення солі до води 5:20. Паросольова суміш колони піднімається в розширювач, обладнаний циклонним паросепаратором. Отримана пара при температурі близько 150 ºС проходить турбіну та конденсатор і використовується для підігріву вихідної води. Охолоджена до 125-200 ºС сіль нагрівається в газовому соленагрівачі і повертається до схеми. Є опис схеми установки (рис. 1.4), в якій в якості теплоносія використаний галечник [7].




1 – вертикальна колона; 2 – кульовий млин; 3 – випарна колона; 4 – компресор; 5 – елеватор із перфорованими ківшами; 6 – турнікет

Рисунок 1.4 – Схема опріснювача мінералізованої води з використанням теплоносія галечника

Вода для опріснення надходить у вертикальну колону 1, де вона контактує з галечником, що рухається знизу вгору. Після колони вода подається на кульовий млин 2, де відокремлюється від частково захопленої потоком частини галечника і піднімається у випарну колону 3, просуваючись по якій вона підігрівається і закипає в результаті контакту з гарячим галечником, що піднімається елеватором з перфорованими ковшами 5. Тепло конденсації йде на нагрів галечника. Галечник з колони 3 надходить на млин, де очищається від накипу, що утворилася на поверхні при випаровуванні мінералізованої води. Подача галечника у випарну колону проводиться турнікетом 6.

Переваги даної знешкоджуючої установки в тому, що вона не має теплопередаючих поверхонь, відсутній розсіл, що зазвичай у великих кількостях скидається з очисних установок інших типів. Установка не потребує циркуляційних насосів, вода, що знешкоджується, може подаватися в неї без деаерування.

Деякі труднощі в експлуатації подібної установки можуть виникнути під час роботи елеватора, а також внаслідок значних витрат енергії на власні потреби: привід млина, елеватора, компресора.

Г. Нагель в такій же схемі пропонує використовувати в якості теплоносія металеві кулі з нержавіючої сталі або титану діаметром 12 - 38 мм, нагрівання яких рекомендується робити в печі до температури 550 - 800 $^{o}$C, з подальшим охолодженням їх випарювальним розчином. В результаті на поверхні куль випадають солі, які відокремлюються в барабанному млині при безперервній циркуляції в системі [8].

Її недоліки:

1) Низька ефективність випарювання у зануреному шарі куль.

2) Велика витрата електроенергії на циркуляцію куль у системі.

Відома установка для сушіння та концентрування рідких розчинів та суспензії за патентом Франція № 2458301, що характеризується тим, що розчин безперервно подають на поверхню елементів, які продувають гарячим

газом. В результаті розчин висихає, а твердий продукт разом з елементами виводиться та очищається.

Недоліки цієї установки [1, 7]:

1) Велика енергоємність, оскільки за безперервної циркуляції шар продукту дуже малий.

2) Низька інтенсивність випарювання при безперервній подачі розчину.

Усунення цих недоліків і визначило напрямок роботи. Для цього пропонується подачу розчину на інертний теплоносій зробити періодичною. Тим самим збільшується інтенсивність випарювання, оскільки шар рідини на теплоносії буде меншим, а, отже, випаровування інтенсивніше. При цьому після просушування завантаження гарячим газом або парою процес можна повторити, тим самим нарощуючи шар продукту на елементах завантаження, що зменшує енергоємність при циркуляції завантаження.

У ході попередніх дослідів [19] хороші результати були отримані при застосуванні в якості завантаження для найбільш максимального відкладення солей на ній, гранульованого доменного шлаку комбінату «Запоріжсталь». При цьому в якості мінералізованих стоків використовувалася стічна вода Запорізького титано-магнієвого комбінату з вмістом солей 12 – 15 г/л. Максимально можлива кількість солей, що відклалася в шарі, склала 20 - 23% від завантаження. Однак це завантаження має такі недоліки:

1) Складність відділення осаджених солей від шлаку.

2) У процесі зрошення шлаку розчином відбувається його руйнування та винесення дрібних частинок із розчином, що веде до забруднення стоків.

Проводилися досліди з використання як інертного проміжного теплоносія (завантаження) залізорудних котунів. Маса відкладених солей у при цьому становила 10 – 12 % від маси завантаження. Міцність котунів набагато вище, ніж гранульованого доменного шлаку, однак і цей тип проміжного теплоносія має ряд недоліків:

1) Котуни - цінна металургійна сировина, і тому використання їх у вигляді інертного проміжного теплоносія не завжди економічно вигідне.

2) При відділенні шару солей від зерен завантаження в барабанному млині відбувається значне руйнування котунів.

Ці недоліки суттєво усуваються при використанні як проміжний теплоносій завантаження з металевих куль. Вони зручні при обробці в кульовому млині, мають хорошу теплопровідність. Маса відкладень солей становить 8 – 10 % від маси завантаження [9].

Процес випарювання високомінералізованих розчинів можна розділити на три стадії:

1) Нагрів куль гарячим газом.

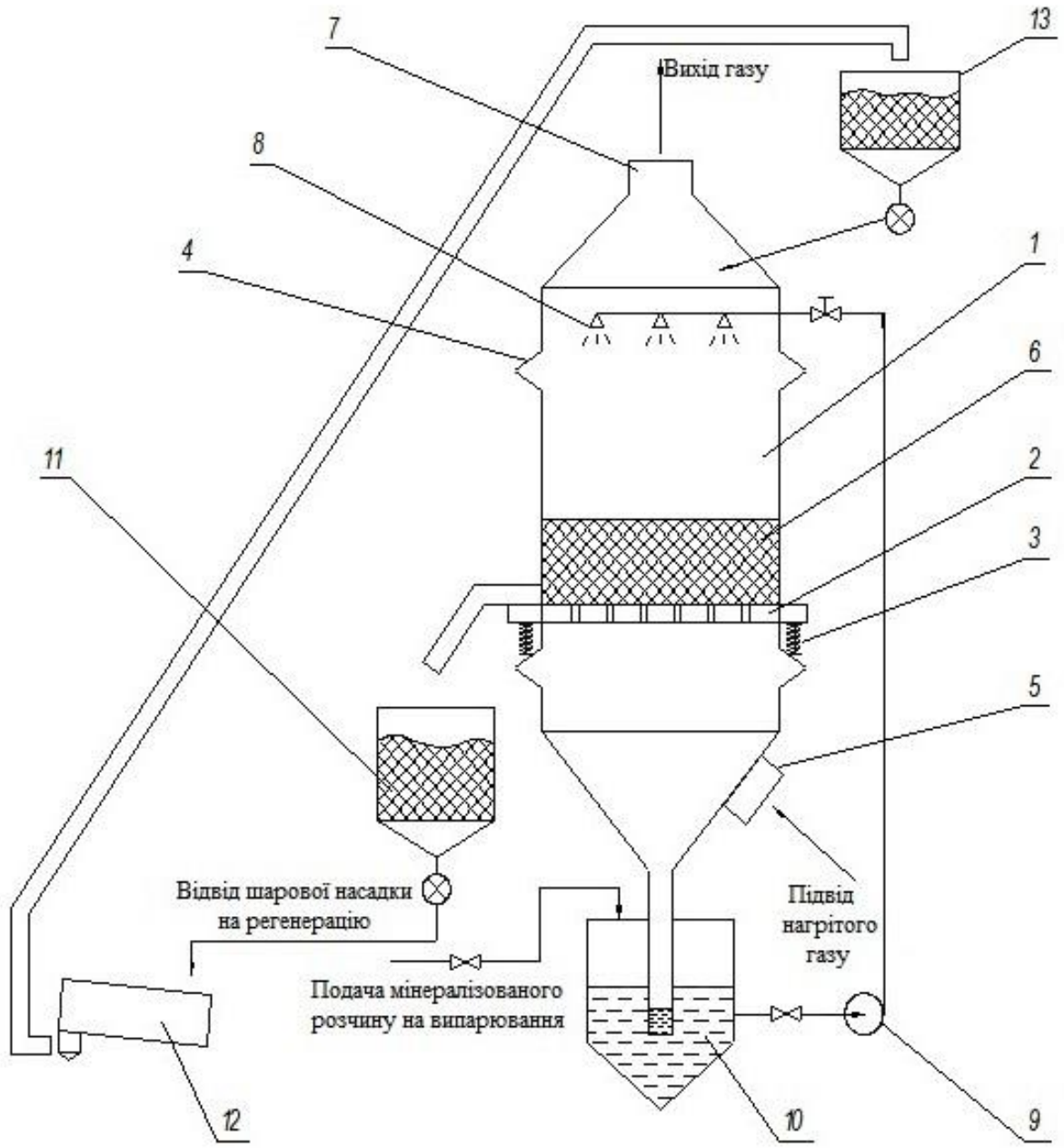
2) Зрошення куль розчином, що призводить до їх охолодження та часткового випаровування розчинів.

3) Випаровування розчину з поверхні проміжного теплоносія.

Лімітуючими стадіями за часом та умовами теплопередачі є перша та третя.

На основі досліджень [9] запропоновано принципову технологічну схему установки зі знешкодження високомінералізованих стічних вод (рис. 1.5). Проміжний теплоносій, що складається з металевих куль діаметром 10 – 20 мм, розміщений у нагрівальній камері на решітці.

У камеру підводиться гарячий газ, що нагріває шар зернистого проміжного теплоносія. Розчин подається через форсунки порційно, у міру висихання завантаження. Подача розчину на шар призводить до його часткового випаровування та охолодження куль. При цьому на поверхні зерен утворюється плівка кристалів, покрита шаром вологи. У міру її висихання шар кристалів збільшується. Кількість солей, що відклалися на твердому проміжному теплоносії за один цикл, невелика, тому подача розчину повторюється кілька разів. Після цього кульова насадка з плівкою кристалів солей виводиться з нагрівальної камери і прямує на механічну обробку в кульовий млин. Вилучені металеві кулі після регенерації повертаються до циклу знесолення.




1 – нагрівальна камера; 2 – опорні грати; 3 – пружини; 4 – компенсатор; 5 – патрубок для підведення газу; 6 – кульова насадка; 7 – патрубок для відведення газу; 8 – система зрошення; 9 – насос; 10 – циркуляційний бак; 11 – бункер прийому куль на регенерацію; 12 – кульовий млин; 13 – кулі після регенерації

Рисунок 1.5 – Принципова технологічна схема випарювання високомінералізованих стічних вод на проміжному твердому теплоносії

Значення коефіцієнта тепловіддачі при данній схемі установки знешкодження знаходяться у межах 80 – 120 Вт/м$^{2}$·К. В установках з киплячим шаром цей коефіцієнт перебуває у межах 65 – 100 Вт/м$^{2}$·К [2]. Витрати енергії в цьому процесі становлять близько 1600 - 1800 кДж/кг випареної вологи, а за оцінками фахівців [2] у майбутньому можуть становити близько 550 кДж/кг випареної води.

Таким чином, розглянута вище установка знешкодження високомінералізованих стічних вод є найбільш ефективною та перспективною, оскільки усуває недоліки установок з рідким гідрофобним теплоносієм, а саме:

1) металеві кулі, на відміну від в'язкого теплоносія, не важко відокремлювати від кристалів солей;

2) висока інтенсивність теплообміну внаслідок великої теплопровідності теплоносія;

3) виключається необхідність відокремлення теплоносія від розчину.

Перевагами також є:

1) При періодичній подачі розчину висока інтенсивність випарювання.

2) Низька енергоємність, оскільки при періодичній циркуляції нарощується найбільший шар продукту.

3) При зрошенні металевих куль розчином не відбувається їх руйнування та забруднення стоків.

4) У кульовому млині, при очищенні куль від накипу, внаслідок їх міцності, вони не руйнуються як, наприклад, залізорудні котуни.

5) Цей спосіб знешкодження дозволяє використати вторинні низькопотенційні енергоресурси.

# 2 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

У випарних апаратах протікають такі основні процеси:

1) гідродинамічні процеси взаємодії між безперервними або дискретними потоками газу та рідини;

2) перенесення тепла і маси між взаємодіючими нагрівним і охолоджуючим середовищами;

3) відрив та винесення крапель рідини з апарату;

4) розчинення газу в рідині та дегазація рідини;

5) відкладення розчинених речовин на внутрішніх елементах апарату.

До основних особливостей роботи випарних апаратів можна віднести наступні:

1) процеси охолодження чи нагрівання середовищ супроводжуються масообміном;

2) нагрівання або охолодження середовищ відбувається до певної температурної межі, після досягнення якої встановлюється динамічна рівновага;

3) нормальна робота випарного апарату можлива у відносно вузькому діапазоні параметрів, що визначається конструкцією апарату, співвідношенням витрат середовищ, їх взаємним напрямом, швидкостями, способами розподілу, винесенням та іншими факторами;

4) процеси формування поверхні контакту між газом і рідиною мають стохастичний характер, що визначається гідродинамічними та тепловими режимами апаратів.

У випарному апараті з проміжним твердим теплоносієм протікають такі процеси:

1) гідродинамічні процеси взаємодії між потоками газу та рідини;

2) перенесення тепла і маси між проміжним теплоносієм і випарюваним розчином;

3) відкладення солей на кульовій насадці.

До основних особливостей роботи випарного апарату з проміжним твердим теплоносієм можна віднести наступне:

1) процес випарювання високомінералізованих стічних вод супроводжується масообміном;

2) нормальна робота випарного апарату можлива у відносно вузькому діапазоні параметрів, що визначається конструкцією апарату, співвідношенням витрат середовищ, їх взаємним напрямом, швидкостями, способами розподілу та іншими факторами;

3) процеси формування поверхні контакту між газом і рідиною мають стохастичний характер, що визначається гідродинамічними та тепловими режимами апаратів [1].

## 2.1 Гідродинаміка випарних апаратів

### 2.1.1 Гідродинамічні режими

Різні гідродинамічні режими у випарних апаратах залежать від напрямку руху теплоносіїв, співвідношення їх масових швидкостей, конструктивних особливостей апаратів та інших чинників [2].

У насадочних випарних апаратах можуть спостерігатися плівковий, проміжний, турбулентний та емульсійний режими.

Відмінності вказаних режимів ілюструються залежністю гідравлічного опору насадкових апаратів від швидкості газової фази (рис. 2.1). У плівковому режимі (ділянка ab) поверхня контакту фаз визначається поверхнею насадки з урахуванням її змочуваності. Гідравлічний опір $\Delta p$ на цій ділянці залежить від швидкості газу $w_г$, віднесеної до вільного перерізу апарату ($\Delta p \sim w_г^2$). У проміжному режимі (ділянка bc) спостерігається руйнування плівки рідини, з'являються завихрення, бризки. При цьому поверхня контакту фаз більша за поверхню насадки. Турбулентний режим (ділянка cd) характеризується проникненням вихорів у плівку рідини

(залежність $\Delta p$ від $w_г$ має вигляд $\Delta p \sim w_г^{4-5}$). У режимі емульгування (ділянка de) турбулізація рідкої фази стає настільки значною, що весь вільний обсяг насадки заповнюється піною. При подальшому збільшенні швидкості газу рух рідини припиняється та спостерігається її винесення з апарату.

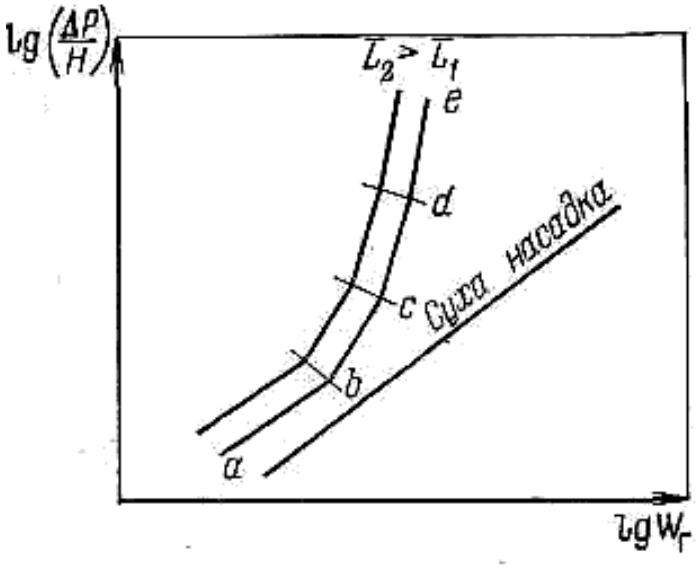



Рисунок 2.1 – Області існування гідродинамічних режимів у насадочних випарних апаратах

### 2.1.2 Гідравлічний опір

Гідравлічний опір випарних апаратів визначається конструктивними параметрами апарату та насадки, гідродинамічним режимом течії, режимними параметрами взаємодіючих середовищ (щільність зрошення $\bar{u}_0$ або витрата рідини $L$, швидкість газу $w_г$ або його витрата $G$ та інше), а також їх фізичними властивостями.

Гідравлічний опір насадочних випарних апаратів багато в чому визначається швидкістю газу. У більшості випадків її вибирають таким чином, щоб апарат працював поблизу точки інверсії, коли інтенсивність процесів максимальна, а винесення рідини невелике.

Приймають

$$w_Г = (0{,}8 - 0{,}85) \cdot w_i \,, \tag{2.1}$$

де $w_i$ - швидкість газу в точці інверсії.

Величину $w_i$ визначають на основі співвідношення

$$\mathrm{Re}'_Г = 0{,}045 \cdot Ar^{0{,}57} \cdot \left(\frac{G}{L}\right)^{0{,}43}, \tag{2.2}$$

де – модифікований критерій Рейнольдса;

$Ar = \dfrac{g \cdot l^3 \cdot \Delta p}{\nu^2 \cdot \rho}$ – критерій Архімеда;

$G$ – витрата газу;

$L$ – витрата рідини.

Гідравлічний опір незмоченого (сухого, незрошуваного) шару насадки заввишки $H$ для випадків руху газу каналами між елементами насадки визначають за співвідношенням

$$\frac{\Delta p_c}{H} = \frac{\lambda^T \cdot w_Г^2 \cdot \rho_Г \cdot a}{8 \cdot \varepsilon^3}. \tag{2.3}$$

Коефіцієнт гідравлічного опору $\lambda^{\text{т}}$ для насадки у вигляді куль при ламінарному та турбулентному гідродинамічних режимах знаходять за співвідношенням:

$$\lambda^T = \frac{133}{\mathrm{Re}_Г} + 2{,}34\,. \tag{2.4}$$

Гідравлічний опір шару зрошеної змоченої насадки $\Delta p_{\text{о}}$ завжди більший $\Delta p_{\text{с}}$.

Опір змоченої насадки у точці інверсії визначається співвідношенням [2].

$$\Delta p_o = \Delta p_c \cdot (1 + f^*), \tag{2.5}$$

в якому

$$f^* = A \cdot \left(\frac{L}{G}\right)^{b_1} \cdot \left(\frac{\rho_Г}{\rho_p}\right)^{b_2} \cdot \left(\frac{\mu_p}{\mu_Г}\right)^{b_3}. \tag{2.6}$$

Значення коефіцієнтів $A$, $b_1$ $b_2$, $b_3$ рівняння наведено у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Значення коефіцієнтів $A$, $b_1$ $b_2$, $b_3$

| Система | Область використання | $A$ | $b_1$ | $b_2$ | $b_3$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Газ – рідина | $\left(\frac{L}{G}\right)^{1,8} \cdot \left(\frac{\rho_Г}{\rho_p}\right) \cdot \left(\frac{\mu_p}{\mu_Г}\right)^{0,2} < 0{,}5$ | 8,40 | 0,405 | 0,225 | 0,045 |
| Газ – рідина | $\left(\frac{L}{G}\right)^{1,8} \cdot \left(\frac{\rho_Г}{\rho_p}\right) \cdot \left(\frac{\mu_p}{\mu_Г}\right)^{0,2} > 0{,}5$ | 10,00 | 0,945 | 0,525 | 0,105 |

За методикою Т. Теутша [3], відношення опору змоченої насадки до опору сухої являє собою залежність

$$\lg \cdot \left(\frac{\Delta p_o}{\Delta p_c} + 1\right) = 0{,}301 + 0{,}0813 \cdot K, \tag{2.7}$$

де $K = Fr\,\mathrm{Re}_p^{0,8}\left(1 + 5 \cdot 10^{-5}\,\mathrm{Re}_Г\right)$;

$$Fr = \frac{w_p^2 \cdot (1-\varepsilon)}{g \cdot d_p};\ \mathrm{Re}_p = \frac{w_p \cdot d_p}{\nu_p \cdot (1-\varepsilon)};\ \mathrm{Re}_Г = \frac{w_Г \cdot d_p}{\nu_Г \cdot (1-\varepsilon)};$$

де $d_p$=6/$a$ – визначний розмір.

Слід зазначити, що розрахунки по зазначеним співвідношенням дуже чутливі до помилок у визначенні $\varepsilon$, особливо при близькому до 1 (для металевих насадок).

Для визначення гідравлічного опору змоченої насадки зручно користуватися також графо-аналітичним методом Х. Е. Едулджі [4], який встановив, що параметри випарних апаратів для різних типів насадок та різних газів і рідин при різних $\Delta p/H$ описуються залежністю

$$y = c \cdot \left( \frac{Fr_Г}{\mathrm{Re}_{умов}^{0,1}} \right) \cdot \left( \frac{\rho_В}{\rho_р} \right)^2 \cdot \left( \frac{\rho_Г}{\rho_О} \right)^{0,85} = f \cdot \left( \frac{\bar{u}_р}{w_Г} \right), \qquad (2.8)$$

де $Fr_Г = \dfrac{w_Г^2}{g \cdot d}$ – критерій Фруда;

$R_{умов} = \dfrac{w_Г \cdot d \cdot \rho_Г}{\mu_р}$ – умовний критерій Рейнольдса;

$p_г$, $p_р$, $p_о$, $p_в$ – густини робочого газу, рідини, повітря та води;

$d$ – номінальний діаметр елемента насадки;

$u_р$– щільність зрошення рідиною;

$c$ – постійна, залежна від типу, розміру та способу завантаження насадки:

| Тип та спосіб завантаження насадки | Діаметр, мм | c |
|---|---|---|
| Кільця Рашига металеві внавал | 25 – 51 | 0,61 |
| Седла Берля | 13 – 38 | 0,47 |
| Кускова | 15 – 35 | 2,75 |

Також запропонована [5] методика, що підвищує точність визначення гідравлічного опору зрошуваних насадок, заснована на використанні даних опору в системі вода – повітря.

Для системи вода – повітря відношення швидкостей повітря в зрошуваній та сухій насадці, що створюють рівні гідравлічні опори шару $\Delta p = const$, є функцією тільки щільності зрошення водою. Цю функцію записують як

$$\left( \frac{w_o}{w_{co}} \right) \cdot \Delta p = const = A - B\bar{u}_В, \qquad (2.9)$$

або

$$\left(\frac{w_o}{w_{co}}\right)\cdot\Delta p = const = A_1 e^{-B_1\bar{u}_в}. \qquad (2.9а)$$

Послідовність розрахунку гідравлічного опору за цією методикою наступна. Для заданих $\bar{u}_p$ s $w_Г$ рівняння (2.9) або (2.9а) визначається величина $w_{со}$ (приймається $\bar{u}_B = \bar{u}_p$ и $w_o = w_Г$ ).

Для цього значення $w_{со}$ за експериментальними даними, отриманими на системі вода – повітря, визначається величина $\Delta p_{в\text{-}в}$ (рис. 2.2).

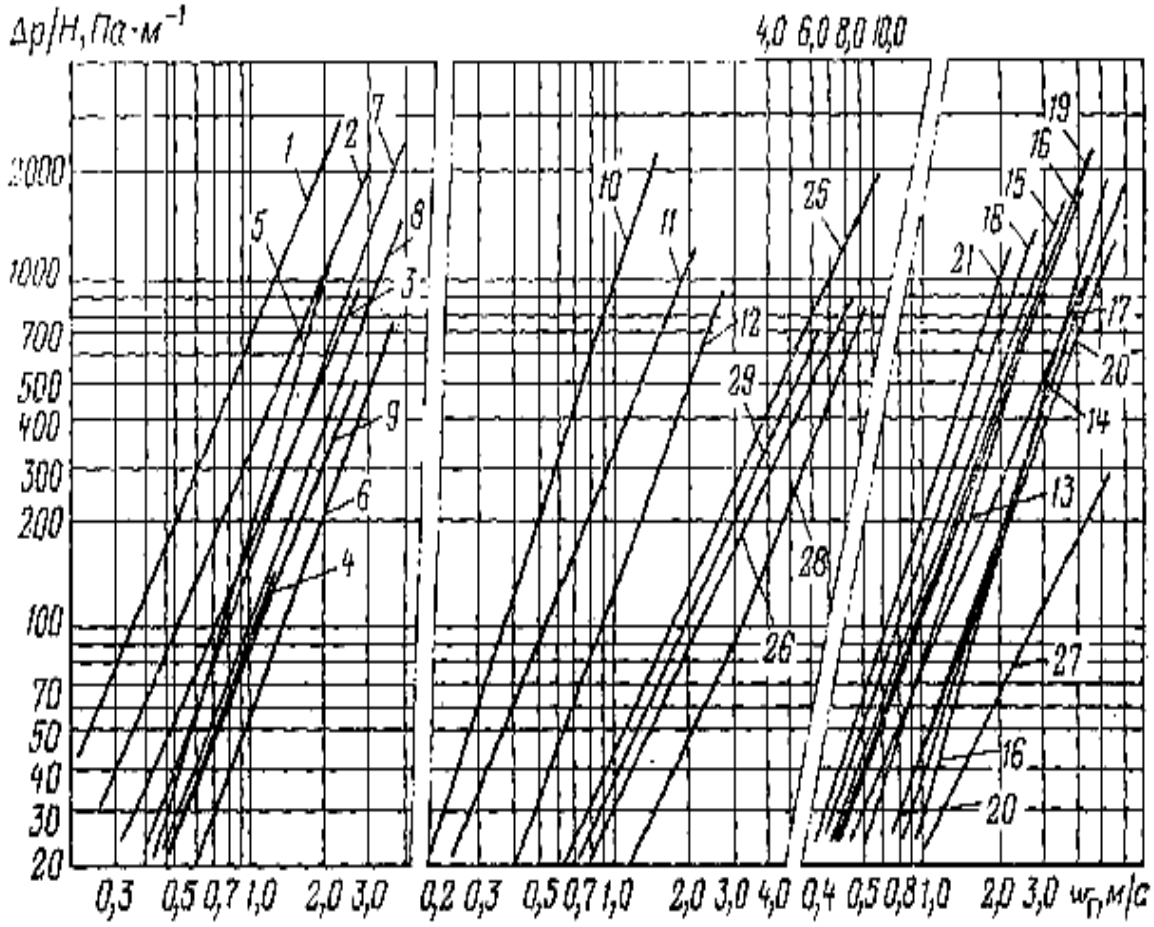



Рисунок 2.2 – Залежність питомого гідравлічного опору сухих насадок різних типів швидкості газу

За величиною $\Delta p_{\text{в-в}}$ та відношенню $\frac{\bar{u}_p}{w_Г}$ отримують величину $y_{\text{в-в}}$. Відношення величин $y_{\text{г-р}}$ к $y_{\text{в-в}}$ одно [5]:

$$\frac{y_{Г-Р}}{y_{В-В}} = \left(\frac{\rho_В}{\rho_р}\right)^2 \cdot \left(\frac{\rho_Г}{\rho_О}\right)^{0,75} \cdot \left(\frac{\bar{u}_p}{w_o}\right)^{0,1}. \qquad (2.10)$$

На основі співвідношення (2.10) за відомою $y_{\text{в-в}}$ знаходять значення $y_{\text{г-р}}$.

Для наближених практичних оцінок під час роботи випарних апаратів у режимах нижче точки інверсії можна використовувати емпіричне рівняння виду [4]

$$\Delta p_o = \Delta p_c \cdot 10^{b\bar{u}_o}, \qquad (2.11)$$

де b - коефіцієнт, значення якого для різних типів насадок наведено нижче:

| Насадка | | $b$ |
|---|---|---|
| Кільця Рашига металеві внавал | | |
| | діаметром 25 мм | 184 |
| | 50 мм | 169 |
| Сідла Берля розміром | 25 мм | 30 |

### 2.1.3 Доведення залежності гідравлічного опору проміжного твердого теплоносія при випаровуванні високомінералізованих стоків

Рух газу через насадку випарного апарату можна розглядати як перебіг паралельними каналами. Якщо насадка складається з правильно покладених елементів, що утворюють паралельні канали постійного перерізу, тоді втрата напору газу під час руху через насадку буде зумовлена втратою енергії на тертя по поверхні каналів. У разі, якщо насадка складається з безладно

завантажених частинок, переріз окремих каналів для проходу газу буде не стійке. При цьому опір течії при ізотермічних умовах складатиметься з опору від тертя газового потоку по поверхні частинок і місцевих опорів, що зумовлюють підвищену турбулізацію потоку. Точно визначити ці опори в безладно завантаженій насадці важко, але порядок кожного з них можна оцінити виходячи з законів течії в трубах; це має значення для висвітлення процесів абсорбції та теплопередачі, які залежать від динамічних умов перебігу. Таким чином:

$$\Delta P = \Delta P_T + \Delta P_M , \tag{2.12}$$

де $\Delta P$ – загальна втрата напору газу під час руху через насадку;

$\Delta P_T$ – втрата напору, зумовлена тертям;

$\Delta P_M$ – втрата напору, зумовлена гідродинамічними чи місцевими опорами.

За аналогією з рухом у трубах, виразимо втрату напору газу, обумовлену тертям за допомогою наступного рівняння:

$$\Delta P_T = \frac{f_T \cdot \overline{w}^2 \cdot \gamma \cdot l}{2 \cdot g \cdot m} . \tag{2.13}$$

Або на 1 м висоти насадки:

$$\Delta P_T = \frac{f_T \cdot \overline{w}^2 \cdot \gamma}{2 \cdot g \cdot m} = \frac{2 \cdot f_T \cdot \gamma \cdot \overline{w}^2}{g \cdot d_э} , \tag{2.14}$$

де $\Delta P_T$ – падіння напору газу, обумовлене тертям потоку по поверхні насадки на 1 м висоти шару (градієнт тиску) в мм водяного стовпа або кг/м$^2$;

$f_T$ – безрозмірний коефіцієнт тертя;

$w$ – середня швидкість м/сек;

$\gamma$ – питома вага газу кг/м$^3$;

$g$ – прискорення сили тяжіння в м/сек$^2$;

$m = \frac{V_{вільн}}{S} = \frac{F_в}{S}$ – гідравлічний радіус, рівний відношенню вільного об'єму насадки до поверхні в одиниці об'єму (в 1 м$^3$);

$d_0 = 4 \cdot m$ – еквівалентний діаметр.

У попередніх дослідах швидкість виражалася в м/сек, враховуючи повний переріз випарного апарату $w_0$. Таким чином

$$w = \frac{w_0}{\overline{F}_A}, \tag{2.15}$$

де $\overline{F}_A$ – середній живий переріз насадки – величина чисельно рівна вільному об'єму.

Визначити дійсну середню швидкость газу у випарному апараті важко, оскільки внаслідок звивистості каналів невідома їхня довжина. Проте величина $\overline{w}$ більш наближається до дійсної середньої швидкості, ніж $\overline{w_0}$.

Тоді

$$\Delta P_T = \frac{f_T \cdot \overline{w}^2 \cdot \gamma}{2 \cdot g \cdot m \cdot \overline{F_A^2}} = \frac{2 \cdot f_T \cdot \gamma \cdot \overline{w_0}^2}{g \cdot d_e \cdot \overline{F_A^2}}. \tag{2.16}$$

Звідки

$$f_T = \frac{\Delta P_T \cdot g \cdot d_e \cdot \overline{F_A^2}}{2 \cdot \gamma \cdot \overline{w_0^2}}. \tag{2.17}$$

Місцеві опори при русі газу через насадку в основному зумовлюються підвищеною турбулізацією потоку внаслідок стиснення та розширення газового струменя при русі каналами змінного перерізу.

Таким чином, втрата напору за рахунок місцевих опорів:

$$\Delta P_M = \Delta P_c + \Delta P_p \,, \tag{2.18}$$

де $\Delta P_c$ – втрата напору, обумовлена стисненням газового потоку;

$\Delta P_p$ – втрата напору, обумовлена розширенням газового потоку.

Рух газового потоку каналом змінного перерізу можна умовно представити як рух через серію послідовно включених діафрагм.

Тоді

$$\Delta P_c = \frac{a \cdot w_2^2}{2 \cdot g}, \tag{2.19}$$

де $w_2$ – швидкість м/сек у звуженому перерізі каналу;

$a$ – коефіцієнт, що залежить від ступеня стиснення, тобто від відношення площ живого перерізу до та після стиснення.

По рівнянню нерозривності струменя або безперервності витрати маємо:

$$F_1 \cdot w_1 = F_2 \cdot w_2 \,. \tag{2.20}$$

Тоді

$$w_2 = \frac{F_1 \cdot w_1}{F_2} \,, \tag{2.21}$$

Та

$$\Delta P_c = \frac{a \cdot \gamma \cdot \bar{w_1^2}}{2 \cdot \bar{g}} \cdot (\frac{F_1}{F_2})^2 \,. \tag{2.22}$$

Втрати, зумовлені розширенням газового потоку:

$$\Delta P_p = \frac{\gamma \cdot (w_2 - w_1)^2}{2 \cdot g} = \frac{\gamma \cdot w_1^2 \cdot (\frac{F_1}{F_2} - 1)^2}{2 \cdot g}. \quad (2.23)$$

Якщо позначити кількість розширень і стиснень газового потоку при русі в каналах насадки на 1 м висоти шару через $\frac{1}{n}$, то $\Delta P_м$ на 1 м висоти насадки дорівнюватиме:

$$\Delta P_M = \Delta P_c + \Delta P_p = \frac{1}{n} \cdot \frac{a \cdot \gamma \cdot w_1^2}{2 \cdot g} \cdot (\frac{F_1}{F_2})^2 + \frac{1}{n} \cdot \frac{\gamma \cdot w_1^2}{2 \cdot g} \cdot (\frac{F_1}{F_2} - 1)^2 = \frac{1}{n} \cdot \frac{\gamma \cdot w_1^2}{2 \cdot g} \cdot [a \cdot (\frac{F_1}{F_2})^2 + (\frac{F_1}{F_2} - 1)^2], \quad (2.24)$$

але

$$w_1^2 = \frac{w_0^2}{F_1^2}, \quad (2.25)$$

і

$$\Delta P_M = \frac{1}{n} \cdot \frac{\gamma \cdot \overline{w_0^2}}{2 \cdot g \cdot F_1^2} \cdot [a \cdot (\frac{F_1}{F_2})^2 + (\frac{F_1}{F_2} - 1)^2]. \quad (2.26)$$

Звідси:

$$\Delta P = \Delta P_T + \Delta P_M = \frac{2 \cdot f_T \cdot \gamma \cdot \overline{w_0^2}}{g \cdot d_e \cdot \overline{F_A^2}} + \frac{1}{n} \cdot \frac{\gamma \cdot \overline{w_0^2}}{2 \cdot g \cdot F_1^2} \cdot [a \cdot (\frac{F_1}{F_2})^2 + (\frac{F_1}{F_2} - 1)^2] =$$
$$= \frac{\gamma \cdot \overline{w_0^2}}{g} \cdot \{\frac{2 \cdot f_T}{d_e \cdot \overline{F_A^2}} + \frac{1}{2 \cdot n \cdot F_1^2} \cdot [a \cdot (\frac{F_1}{F_2})^2 + (\frac{F_1}{F_2} - 1)^2]\} \quad (2.27)$$

Або

$$\frac{\Delta P \cdot g}{\gamma \cdot \overline{w_0^2}} = \frac{2 \cdot f_T}{d_e \cdot \overline{F_A^2}} + \frac{1}{2 \cdot n \cdot \overline{F_1^2}} \cdot [a \cdot (\frac{F_1}{F_2})^2 + (\frac{F_1}{F_2} - 1)^2]. \quad (2.28)$$

Помноживши всі члени рівняння (2.28) на $d_e$ і $\overline{F}_A^2$ та розділивши на 2, отримаємо:

$$\frac{\Delta P \cdot g \cdot d_e \cdot \overline{F_A^2}}{2 \cdot \gamma \cdot \overline{w_0^2}} = f_T + \frac{d_e}{4 \cdot n} \cdot (\frac{\overline{F}_A}{F_1})^2 \cdot [a \cdot (\frac{F_1}{F_2})^2 + (\frac{F_1}{F_2} - 1)^2], \quad (2.29)$$

але

$$\overline{F_A} = \frac{F_1 + F_2}{2} \quad (2.30)$$

і

$$a = \Psi \cdot (\frac{F_1}{F_2}), \quad (2.31)$$

тому

$$(\frac{\overline{F_A^2}}{\overline{F_1}})^2 = [a \cdot (\frac{F_1}{F_2})^2 + (\frac{F_1}{F_2} - 1)^2] = \Psi'(\overline{F}_A). \quad (2.32)$$

Другий член правої частини рівняння (2.29) є коефіцієнтом місцевих опорів, обумовлених стисненням і розширенням газового потоку при русі в насадці:

$$f_M = \frac{d_e}{4 \cdot n} \cdot \Psi' \cdot (\overline{F}_A). \quad (2.33)$$

Тоді

$$\frac{\Delta P \cdot g \cdot d_e \cdot \overline{F_A^2}}{2 \cdot \gamma \cdot \overline{w_0^2}} = f_T + f_M = f', \quad (2.34)$$

де $f'$ – загальний коефіцієнт опору насадки.

Звідси загальна втрата напору газу під час руху через насадку у випарному апараті на 1 м висоти шару:

$$\Delta P = \frac{2 \cdot \gamma \cdot \overline{w_0^2}}{g \cdot d_e \cdot \overline{F_A^2}} \cdot (f_T + f_M) = \frac{2 \cdot \gamma \cdot \overline{w_0^2 \cdot f'}}{g \cdot d_e \cdot \overline{F_A^2}}. \quad (2.35)$$

При цьому

$$f_T = \varphi \cdot (\mathrm{Re}), \tag{2.36}$$

$$f_M = \Psi \cdot (\overline{F}_A). \tag{2.37}$$

Безпосередньо визначити $F_1$ і $F_2$ для безладно завантаженої насадки важко, тому поки що не доводиться включати ці змінні кількісні вирази при обробці експериментальних даних. Однак, зважаючи на те, що вплив швидкості газу, щільності та діаметра фактично один і той же в рівняннях, що виражають опір тертя та втрати внаслідок стиснення та розширення, а коефіцієнт місцевих опорів не є функцією швидкості, можна прийняти, що загальний коефіцієнт опору є також функцією числа Рейнольдса, тобто.

$$f' = \varphi' \cdot (\mathrm{Re}). \tag{2.38}$$

Тому побудова графіка $f'$, обчисленого за рівнянням (2.34), як функції *Re*, та логарифмічних координат є найбільш простим методом обробки та узагальнення експериментальних даних [6].

## 2.2 Тепловий розрахунок випарних апаратів

Система рівнянь випарного апарату складається з рівнянь матеріального та енергетичного балансів, тепло- та масообміну [7].

Рівняння матеріального балансу

$$L' + G \cdot (1 + x') = L'' + G \cdot (1 + x'') + S_{oc} \tag{2.39}$$

$$L' \cdot (1 - b') + G \cdot x' = L'' \cdot (1 - b'') + G \cdot x'' \tag{2.40}$$

$$L' \cdot b' = L'' \cdot b'' + S_{oc} \tag{2.41}$$

де $L'$, $L''$ – витрата рідини (розчину) на вході та виході апарату;

$x'$, $x''$ – вміст рідини в газі на вході та виході апарату;

$b'$, $b''$ – концентрації рідини на вході та виході апарату;

$S_{ос}$ – маса осаду, що виділився з рідини.

Рівняння енергетичного балансу

$$G\cdot\left(c'_{Г}\cdot t'_{Г}+x'\cdot i'\right)+L'\cdot c'\cdot\vartheta'=G\cdot\left(c''_{Г}\cdot t''_{Г}+x''\cdot i''\right)+L''\cdot c''\cdot\vartheta''+S_{ос}\cdot c_{ос}\cdot\vartheta''+Q_{п}, \quad (2.42)$$

де $c'_{Г}$, $c''_{Г}$ – теплоємності газу на вході та виході апарату;

$t'_{Г}$, $t''_{Г}$ – температури газу на вході та виході апарату;

$i'$, $i''$ – ентальпії газу на вході та виході апарату;

$c'$, $c''$ – теплоємності рідини на вході та виході апарату;

$\vartheta'$, $\vartheta''$ – температури рідини на вході та виході апарату;

$c_{ос}$ – теплоємність осаду;

$Q_{п}$ – втрати тепла у навколишнє середовище.

Рівняння теплоперенесення записуються у вигляді

$$Q_{к.а}=k_{V}\cdot\Delta t_{ср}\cdot V, \quad (2.43)$$

$$Q_{к.а.}=k_{F}\cdot\Delta t_{ср}\cdot F, \quad (2.44)$$

де $Q_{к.а}$ – розрахункова кількість тепла, що передається;

$F$ – поверхня контакту фаз;

$k_{V}$, $k_{F}$ – об'ємний та поверхневий коефіцієнти теплопередачі;

$V$ – робочий об'єм апарату;

$\Delta t_{ср}$ – середньотемпературний тиск.

$$Q_{к.а.}=Q_{р}+Q_{ВН}, \quad (2.45)$$

де $Q_{р}$ – тепло, передане розчину в апараті;

$Q_{вн}$ – «внутрішнє» тепло апарату.

«Внутрішнє» (баластове), тепло сприймається газом при випаровуванні води і віддається при конденсації на ділянці наступного випарного апарату.

Наявність $Q_{вн}$ не впливає термодинамічну ефективність випарного апарату, але вимагає збільшення поверхні контакту. Для умов, у яких працюють випарні апарати величина $Q_{вн}$ становить 10 – 15 % від $Q_{К.А}$. Великі значення відповідають вищим початковим температурам газу.

Об'ємний та поверхневий коефіцієнти теплопередачі пов'язані співвідношенням

$$k_V = k_F \cdot a\,. \tag{2.46}$$

Величина $k_F$ визначається коефіцієнтами тепловіддачі $\alpha$ та масовіддачі $\beta$, зв'язок між якими виводиться з рівняння

$$Q_{к.а} = \alpha \cdot F \cdot \Delta t_{ср} \pm \beta r \Delta p\,, \tag{2.47}$$

де $\Delta p$ – середньологарифмічна різниця парціальних тисків водяної пари.

Якщо розділити обидві частини рівняння на $F \cdot \Delta t_{ср}$ то

$$k_F = \alpha \pm \beta r \frac{\Delta p}{\Delta t_{ср}}\,. \tag{2.48}$$

Коефіцієнт $k_F$ випарного апарату залежить від низки факторів

$$k_F = \left(P, t'_Г, t''_Г, \vartheta', \vartheta'', w_Г, b_к, Г, ...\right), \tag{2.49}$$

де $Г$ – геометричні властивості апарату.

Основними рівняннями для розрахунку коефіцієнтів тепло- та масопереносу є:

$$Ki = 0{,}01 \mathrm{Re}_Г^{0,7}\, \mathrm{Re}_p^{0,7}\, \mathrm{Pr}^{0,33} \tag{2.50}$$

$$Ki = \left(19 + 0{,}033 \mathrm{Re}_Г\right) \cdot \mathrm{Pr}^{0,33} \tag{2.51}$$

$$Ki = 0{,}081 \mathrm{Re}_Г^{0,5}\, \mathrm{Re}_p^{0,5}\, \mathrm{Pr}^{0,33} \tag{2.52}$$

де $Ki = \frac{k_F \cdot d_e}{\lambda_Г}$ – критерій Кірпичова;

$\mathrm{Pr} = \frac{\nu}{a}$ – критерій Прандтля.

Таким чином, можна зробити наступний висновок, що гідродинамічні та теплові режими випарного апарату залежать від основних характеристик теплоносія як швидкість газового потоку і температура газу.

## 2.3 Лабораторні дослідження гідродинамічних та теплових режимів випарного апарату при знешкодженні високомінералізованих стічних вод на проміжному твердому теплоносії

### 2.3.1 Опис лабораторної установки

Для дослідження гідродинамічних та теплових процесів випарювання високомінералізованих стічних вод на інертному проміжному теплоносії було створено лабораторну установку, схему якої представлено на рис.2.3.

Лабораторна установка складається з електропідігрівача 1 і випарної колони 4, в якій знаходиться інертний теплоносій 6, у вигляді металевих куль, діаметром 10 - 15 мм. Повітря, що подається нагрівається в підігрівачі 1 і через патрубок 2 і грати 5 подається в камеру 4. Розчин з циркуляційної ємності 7 під тиском, створюваним повітряним насосом 10, подається в колону 4, де частина його випаровується, а частина стікає через розподільну камеру 3 та гідрозатвор 8 в мірну посудину 9. Вода, що залишилася на теплоносії, випаровується поступаючим нагрітим повітрям.

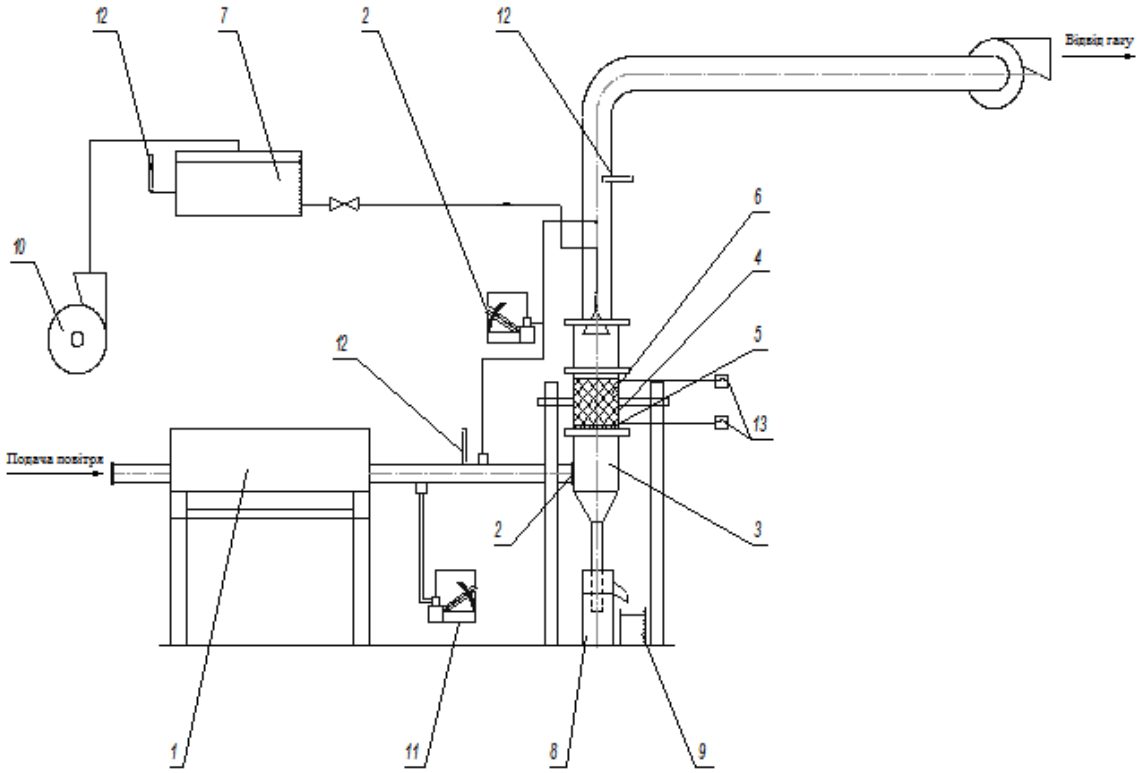



Рисунок 2.3 – Лабораторна установка для випарювання високомінералізованих стічних вод

### 2.3.2 Методика проведення досліджень

У нагрівальну камеру подається повітря, попередньо нагріте електропідігрівачем до температури не нижче 200 ºС. Нагріте повітря, проходячи через шар куль, віддає тепло і відводиться через патрубок. Нагріте повітря подається вентилятором через патрубок, доки на виході з патрубка температура повітря не буде менше 110 ºС і температура завантаження в середньому не буде дорівнює 140 ºС. Чим вище температура куль, тим інтенсивніше відбувається випарювання. При безперервному нагріванні проміжного теплоносія після досягнення необхідної температури куль виконуємо циклічне зрошення завантаження розчином до тих пір, поки концентрація розчину на виході з камери не буде дорівнювани або трохи перевищувати концентрацію розчину на вході в нагрівальну камеру. При

цьому частина води випаровується, частина змочує насадку, а залишок води повертається в циркуляційну ємність. Під дією гарячого газоподібного теплоносія спочатку відбувається плівкове випарювання мінералізованого розчину з утворенням на поверхні металевих куль накипу солі, а потім нагрів куль твердого теплоносія. Далі процес знову повторюється.

Таким чином, досліджуваний процес випарювання високомінералізованих стічних вод складається з трьох стадій:

1. нагрівання проміжного теплоносія гарячим газом;

2. зрошення куль розчином;

3. сушіння проміжного теплоносія, тобто випаровування розчину з поверхні куль.

Лімітуючими стадіями за часом та умовами теплопередачі є перша та третя.

Під час проведення експерименту вимірюються такі параметри (рис. 2.3):

1. Площа поверхні проміжного інертного теплоносія $F_к = \pi d_{ср}^2$, де $d_{ср}$ – середній діаметр куль.

2. Витрата повітря, що підігрівається G. Вимір проводиться за допомогою U-подібного манометра 11.

3. Визначення перепаду гідравлічного опору на вході в апарат та на виході з нього. Вимірювання здійснюється за допомогою мікроманометра 11.

4. Визначення швидкості подаваємого повітря. Вимірювання здійснюється за допомогою мікроманометра 11.

5. Температура повітря перед випарником $t_1$ – термометром 12.

6. Температура повітря на виході з випарника $t_2$ – термометром 12.

7. Температура у нижньому шарі теплоносія $t_3$ – термопарою 13.

8. Температура у верхньому шарі теплоносія $t_4$ – термопарою 13.

9. Температура подаваємої води $t_5$ – термометром 12.

10. Площа перетину біля решітки $F$.

11. Вага насадки $S_к$.

12. Висота шару завантаження $H$.

13. Через $n$ циклів вага шару з солями $S_к + S_с$.

14. Кількість поданого розчину $L_1$ – мірною посудиною 7.

15. Кількість розчину, що стік $L_2$ – мірною посудиною 9.

16. Температура повітря на вході $t_0$ вимірюється термометром 12.

При нагріванні куль виконуються виміри:

1) витрата повітря $w_Г$;

2) температура нагрітого повітря на вході у випарник $t_1$;

3) температура нагрітого повітря на виході з випарника $t_2$;

4) температура нижнього шару куль $t_3$;

5) температура верхнього шару куль $t_4$;

6) час нагрівання верхнього шару до 140 °С;

7) температура повітря, що подається $t_0$.

При зрошенні куль виконуються виміри:

1) температура нижнього шару куль $t_3$;

2) температура верхнього шару куль $t_4$;

3) кількість поданого розчину $L_1$;

4) кількість розчину, що стік $L_2$;

5) температура води, що подається $t_5$.

При випаровуванні рідини виконуються виміри:

1) витрата повітря, що подається $w_Г$;

2) температура нагрітого повітря на вході у випарник $t_1$;

3) температура нагрітого повітря на виході з випарника $t_2$;

4) температура нижнього шару куль $t_3$;

5) температура верхнього шару куль $t_4$;

6) час нагрівання верхнього шару до 140 °С;

7) температура повітря, що подається $t_0$.

### 2.3.3 Обробка результатів експерименту визначення залежності гідравлічного опору

Були проведені досліди на зернистій насадці з різними діаметрами куль 10 та 15 мм. У процесі випарювання вода подавалася циклічно зі швидкістю 2, 2,5 та 3 м/с. Внаслідок чого було виявлено, що гідравлічний опір випарного апарату залежить від швидкості гарячого теплоносія та типу насадки (суха або мокра).

Усі контрольовані параметри при проведенні експерименту занесені в табл. 2.2. Залежність зростання гідравлічного опору шару теплоносія від швидкості газового потоку представлена рисунку 2.4.

Отже, можна дійти висновку, що під час лабораторного дослідження спостерігалася залежність – зі збільшенням швидкості гарячого теплоносія, збільшувався і гідравлічний опір випарного апарату. Причому на кулях, діаметром 10 мм, зростання опору було більше, ніж на насадці з діаметром куль 15 мм. Це тим, що порізність шару між кулями з діаметром 10 мм швидше зменшується, ніж шарах діаметром 15 мм, зі збільшенням швидкості гарячого теплоносія.

Також спостерігалася залежність гідравлічного опору типу насадки. Гідравлічний опір випарного апарату зростає швидше на мокрій насадці, ніж сухий. Це пояснюється тим, що при зрошенні куль розчином, рідина заповнює порожнечі між кулями, внаслідок чого зменшується порізність шару і зростає гідравлічний опір.

Загалом, за результатами досліджень, циклічне випарювання високомінералізованих розчинів на проміжному твердому теплоносії призводить до утворення та зростання плівки солей на елементах завантаження. Таким чином, відбувається зменшення порізності шару до критичного значення та зростає гідравлічний опір проміжного твердого теплоносія.

Таблиця 2.2 - Результати експериментальних досліджень

| № п/п | Діаметр куль d, мм | Швидкість газу $W_г$, м/с | Тип насадки | Гідравлічний опір | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | $\Delta p$, Па | $\Delta p_{ср}$, Па |
| 1 | 10 | 2 | суха | 17 | 17 |
| 2 | | | мокра | 20 | 25 |
| 3 | | | | 22 | |
| 4 | | | | 26 | |
| 5 | | | | 28 | |
| 6 | | | | 31 | |
| 7 | | 2,5 | суха | 48 | 48 |
| 8 | | | мокра | 54 | 81 |
| 9 | | | | 67 | |
| 10 | | | | 81 | |
| 11 | | | | 98 | |
| 12 | | | | 104 | |
| 13 | | 3 | суха | 109 | 109 |
| 14 | | | мокра | 127 | 176 |
| 15 | | | | 153 | |
| 16 | | | | 175 | |
| 17 | | | | 203 | |
| 18 | | | | 224 | |
| 19 | 15 | 2 | суха | 15 | 15 |
| 20 | | | мокра | 18 | 23 |
| 21 | | | | 21 | |
| 22 | | | | 23 | |
| 23 | | | | 25 | |
| 24 | | | | 28 | |
| 25 | | 2,5 | суха | 36 | 36 |
| 26 | | | мокра | 42 | 62 |
| 27 | | | | 51 | |
| 28 | | | | 62 | |
| 29 | | | | 73 | |
| 30 | | | | 82 | |
| 31 | | 3 | суха | 96 | 96 |
| 32 | | | мокра | 105 | 147 |
| 33 | | | | 127 | |
| 34 | | | | 149 | |
| 35 | | | | 163 | |
| 36 | | | | 192 | |

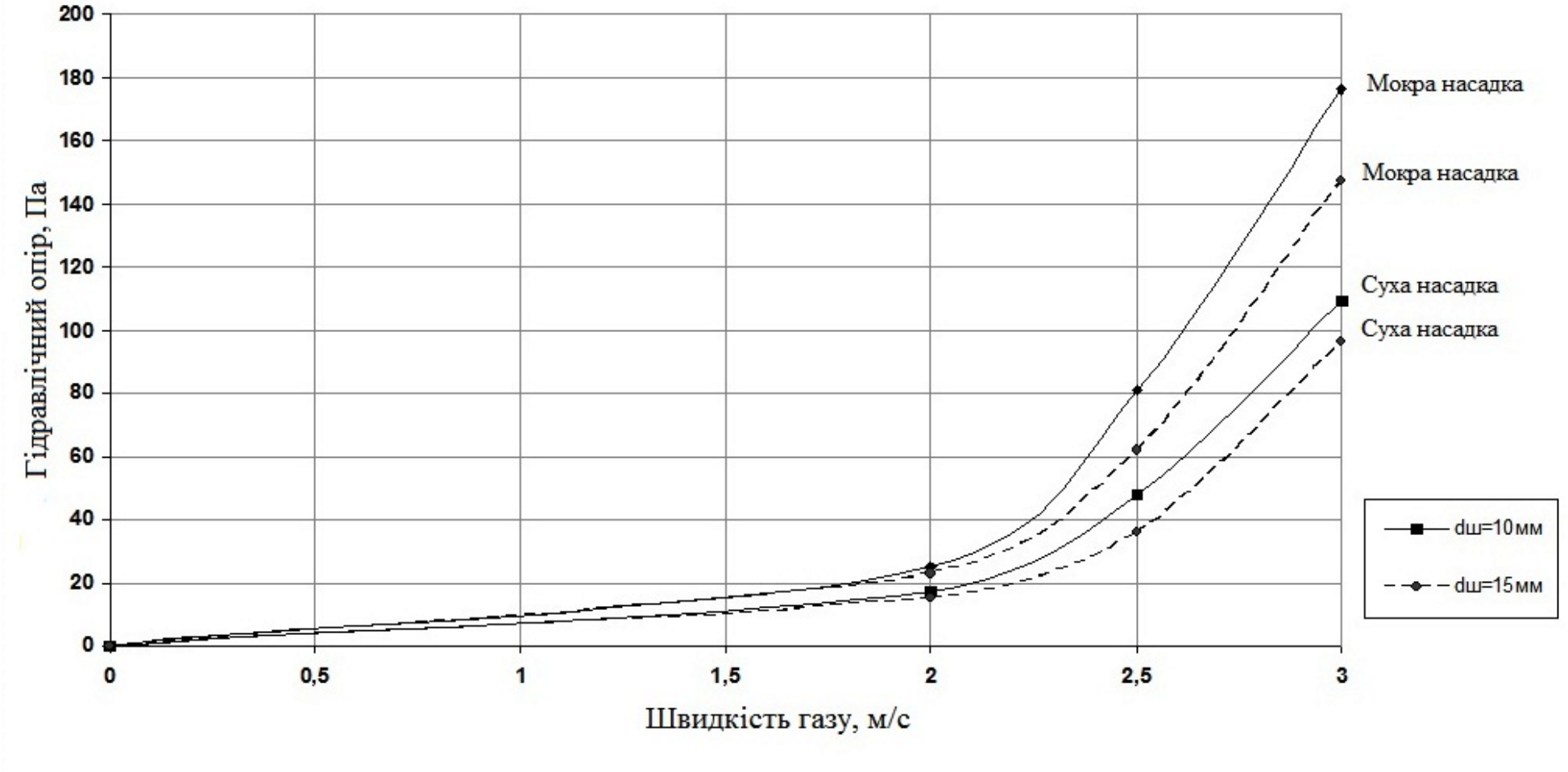



Рисунок 2.4 – Залежність росту гідравлічного опору шару теплоносія від швидкості газового потоку

Для подальшої ефективної експлуатації випарного апарату необхідно щоб порізність зернистого шару, в процесі випарювання, була якомога більше свого критичного значення. Тому проміжний твердий теплоносій необхідно регенерувати - виводити з апарату і направляти на механічну обробку для видалення шару солей. Потім його повторно використовують для випаровування.

Загалом, за результатами досліджень, циклічне випарювання високомінералізованих розчинів на проміжному твердому теплоносії призводить до утворення та зростання плівки солей на елементах завантаження. Таким чином, відбувається зменшення порізності шару до критичного значення та зростає гідравлічний опір проміжного твердого теплоносія. Для подальшої ефективної експлуатації випарного апарату необхідно щоб порізність зернистого шару, в процесі випарювання, була якомога більше свого критичного значення. Тому проміжний твердий теплоносій необхідно регенерувати - виводити з апарату і направляти на механічну обробку для видалення шару солей. Потім його повторно використовують для випаровування.

### 2.3.4 Обробка результатів експерименту визначення залежності коефіцієнта тепловіддачі

При проведенні експерименту вимірювалися також теплові параметри теплоносія, в результаті чого був розрахований коефіцієнт тепловіддачі і визначена його залежність від середньої різниці температур між теплоносіями, що нагріває і нагрівається (температурного напору).

На початку випарювання температура куль після зрошення дорівнюватиме температурі мокрого термометра $t'_к - t_м$. В кінці випарювання

$$t = \frac{t_Г + t_м}{2}, \tag{2.53}$$

де $t_Г$ – температура газу.

Середня температура куль:

$$t = \frac{t'_к + t''_к}{2}. \quad (2.54)$$

Середня температура газу:

$$t = \frac{t'_Г + t''_Г}{2}. \quad (2.55)$$

Температурний напір:

$$\Delta t = \bar{t}_Г - \bar{t}_к. \quad (2.56)$$

Питома поверхня теплоносія:

$$F = (1-\varepsilon)\cdot\frac{6}{d_{ср}}, \quad (2.57)$$

де $\varepsilon$ – порізність шару,

$d_{ср}$ – середній діаметр куль.

Еквівалентний діаметр:

$$d_е = \frac{4\cdot\varepsilon}{F}. \quad (2.58)$$

Критерій Нусельта:

$$Nu = 0{,}61\cdot \mathrm{Re}^{0{,}67}. \quad (2.59)$$

Критерій Рейнольдса по газу:

$$\mathrm{Re}_Г = \frac{W_Г\cdot d_е}{\nu_Г}. \quad (2.60)$$

Коефіцієнт теплопередачі газу до теплоносія:

$$\alpha_Г = \frac{Nu\cdot A}{d_е}, \quad (2.61)$$

де $A$ – коефіцієнт теплопровідності.

Об `єм насадки:

$$V_н = F \cdot H\,. \tag{2.62}$$

Об `єм куль:

$$V_к = V_н \cdot (1-\varepsilon). \tag{2.63}$$

Вага насадки:

$$S_н = V_к \cdot \rho_к. \tag{2.64}$$

Кількість тепла, передане насадці:

$$Q = S_н \cdot C_н \cdot (t_п - t_к), \tag{2.65}$$

де $S_н$ – вага насадки;

$C_н$ – теплоємність насадки;

$t_п, t_к$ – початкова та кінцева температура газу.

Тепловий потік:

$$q = K \cdot \Delta t \cdot F_{тепл}, \tag{2.66}$$

де $F_{тепл}$ – поверхня теплообміну.

Коефіцієнт теплопередачі:

$$K = \alpha_1 \cdot \mu_1, \tag{2.67}$$

де $\alpha_1$ – коефіцієнт тепловіддачі;

$\mu_1$ – поправка на кондукцію, яка залежить від критерію

$$Bi = \frac{\alpha \cdot R}{\lambda}, \qquad (2.68)$$

де $R$ – радіус куль.

При $Bi$ <0,1, $\mu_1$ нехтують.

Час нагріву куль:

$$\tau_н = \frac{Q}{q_1}. \qquad (2.69)$$

Коефіцієнт тепловіддачі при сушці [20]:

$$Nu = 5{,}97 \cdot 10^{-2} \cdot Ar^{-0{,}438} \cdot \mathrm{Re}^2 \cdot Cu^{0{,}61} \cdot \left(\frac{H_0}{d}\right)^{-1}, \qquad (2.70)$$

де $H_0$ – висота шару;

$d$ – діаметр куль;

$$Ar = \frac{g \cdot d_к^3}{\nu} \cdot \frac{\rho_c - \rho_Г}{\rho_Г},$$

$\rho_c$ – щільність солі;

$$\mathrm{Re} = \frac{W \cdot d}{\nu \cdot \varepsilon},$$

$Cu = \frac{T_c + T_м}{T_м}$ – температура сухого та мокрого термометра.

Коефіцієнт тепловіддачі від куль до рідини:

$$\alpha_р = \frac{Nu \cdot \lambda}{d_е}. \qquad (2.71)$$

Тепловий потік:

$$q_2 = K \cdot F \cdot \Delta t .$$

Коефіцієнт теплопередачі:

$$K = \alpha_2 \cdot \mu_2 ,$$

$$\mu = \left(1 + 0{,}2 \cdot Bi\right)^{-1},$$

$$Bi = \frac{\alpha \cdot R}{\lambda} .$$

Час сушки:

$$\tau_c = \frac{Q}{q_2} .$$

Таким чином, коефіцієнт тепловіддачі при сушінні змоченого теплоносія визначається з (2.70)

$$Nu = 5{,}97 \cdot 10^{-2} \cdot Ar^{-0{,}438} \cdot \mathrm{Re}^{2} \cdot Cu^{0{,}61} \cdot \left(\frac{H_0}{d}\right)^{-1} .$$

$$\alpha' = 5{,}97 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{g^{-0{,}438} \cdot d_к^{-1{,}314}}{\nu^{0{,}438}} \cdot \frac{w^2 \cdot d_к^3}{\nu^2} \cdot \left(\frac{T_c + T_м}{T_c}\right)^{0{,}61} \cdot \frac{d}{H_0} . \qquad (2.72)$$

Коефіцієнт тепловіддачі при нагріванні куль визначається з (2.59):

$$Nu = 0{,}61 \cdot \mathrm{Re}^{0{,}67} .$$

Звідки

$$\alpha'' = 0{,}61 \cdot \left(\frac{w \cdot d_к}{\nu}\right)^{0{,}67} \cdot \frac{\lambda}{d_к} . \qquad (2.73)$$

Коефіцієнт тепловіддачі всього процесу:

$$\alpha = \alpha' \cdot \frac{\tau_c}{\tau_ц} + \alpha'' \cdot \frac{\tau_н}{\tau_ц} , \qquad (2.74)$$

де $\tau_ц$ – час одного циклу між зрошенням.

Рушійною силою теплових процесів є різниця температур середовищ, за наявності якої тепло поширюється від середовища з більшою температурою до середовища з меншою температурою. При теплопередачі від одного теплоносія до іншого різниця між температурами теплоносія не зберігає постійного значення вздовж поверхні теплообміну, і тому в теплових розрахунках, де застосовується основне рівняння теплопередачі до кінцевої поверхні теплообміну, необхідно користуватися середньою різницею температур.

Температурний напір:

$$\Delta t_{ср} = \frac{\Delta t_{н} - \Delta t_{к}}{\ln \frac{\Delta t_{к}}{\Delta t_{к}}}. \qquad (2.75)$$

Температурний напір на початку циклу:

$$t_{н} = \frac{t_1^{н} + t_2^{н}}{2} - \frac{t_3^{н} + t_4^{н}}{2}, \qquad (2.76)$$

де $t_1^{н}$ – температура повітря на вході у випарник на початку циклу;

$t_2^{н}$ – температура повітря на виході на початку циклу;

$t_3^{н}$ – показання термопар нижнього шару на початку циклу;

$t_4^{н}$ – показання термопари верхнього шару на початку циклу

Температурний напір в кінці циклу:

$$\Delta t_{к} = \frac{t_1^{к} + t_2^{к}}{2} - \frac{t_3^{к} + t_4^{к}}{2}, \qquad (2.77)$$

де $t_1^{к}$ – температура повітря на вході у випарник в кінці циклу;

$t_2^{к}$ – температура повітря на виході в кінці циклу;

$t_3^{к}$ – показання термопар нижнього шару в кінці циклу;

$t_4^{к}$ – показання термопари верхнього шару в кінці циклу.

Кількість тепла, витраченого на нагрівання повітря:

$$Q = c \cdot \frac{G \cdot \tau}{\rho} \cdot \left( \frac{t_1^н + t_1^к}{2} - t_0 \right). \quad (2.78)$$

Коефіцієнт тепловіддачі:

$$\alpha = \frac{Q}{\Delta t \cdot F}, \quad (2.79)$$

де $F$ – площа теплообміну.

Теоретичний коефіцієнт тепловіддачі визначається за формулами (2.72 – 2.74).

Отримані експериментальні дані дозволяють визначити коефіцієнт теплопередачі.

Вихідні дані та дані розрахунків зведені до таблиці 2.3.

Залежність коефіцієнта тепловіддачі від температурного тиску представлена рисунку 2.5.

В результаті отриманих розрахунків спостерігається залежність – зі збільшенням температурного напору зменшується коефіцієнт тепловіддачі. Це пояснюється тим, що при випаровуванні розчину з поверхні куль парові бульбашки, що утворюються на поверхні нагріву, зливаються в парову плівку, що перешкоджає теплообміну між поверхнею нагрівання та рідиною. При цьому зі збільшенням температурного напору товщина парової плівки зростає і тепловий потік зменшується.

Розрахунок процесів перенесення тепла у випарних апаратах є пов'язаним завданням спільного розрахунку процесів у фазах, що взаємодіють. Основні труднощі виникають через те, що деякі геометричні характеристики процесів (розміри та форма бульбашок, крапель, потік тощо) та їх гідродинамічні характеристики (швидкості та ін.) змінюються стохастично.

Таблиця 2.3 – Результати експериментальних досліджень процесу випарювання розчину

| № з/п | Показник | Позначення | Од. вим. | № Експерименту | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 1 | Температура повітря на вході у випарник на початку циклу | $t_1^н$ | °С | 180 | 200 | 220 | 240 | 260 | 280 | 300 | 320 |
| 2 | Температура повітря на вході у випарник в кінці циклу | $t_1^к$ | °С | 183 | 198 | 220 | 237 | 262 | 280 | 305 | 325 |
| 3 | Температура повітря на виході на початку циклу | $t_2^н$ | °С | 95 | 120 | 123 | 125 | 154 | 158 | 193 | 217 |
| 4 | Температура повітря на виході в кінці циклу | $t_2^к$ | °С | 124 | 169 | 170 | 165 | 197 | 197 | 225 | 246 |
| 5 | Показання термопари нижнього шару на початку циклу | $t_3^н$ | °С | 53 | 62 | 56 | 82 | 107 | 115 | 161 | 187 |
| 6 | Показання термопари нижнього шару в кінці циклу | $t_3^к$ | °С | 147 | 177 | 186 | 189 | 224 | 227 | 250 | 273 |
| 7 | Показання термопари верхнього шару на початку циклу | $t_4^н$ | °С | 70 | 84 | 75 | 70 | 70 | 75 | 84 | 89 |
| 8 | Показання термопари верхнього шару в кінці циклу | $t_4^к$ | °С | 140 | 140 | 140 | 140 | 140 | 140 | 140 | 140 |
| 9 | Температурний напір на початку циклу | $\Delta t_н$ | °С | 76 | 87 | 106 | 106,5 | 118,5 | 124 | 124 | 130,5 |
| 10 | Температурний напір в кінці циклу | $\Delta tк$ | °С | 10 | 25 | 32 | 36,5 | 47,5 | 55 | 70 | 79 |
| 11 | Температурний напір | $\Delta t$ | °С | 29,5 | 46,5 | 58,5 | 62,5 | 75 | 82 | 91,5 | 100 |
| 12 | Температура повітря перед вентилятором | $t_о$ | °С | 20 | 21 | 21 | 21 | 21 | 22 | 22 | 23 |
| 13 | Витрата повітря | $G$ | м³/ч | 18 | 18 | 16 | 16 | 16 | 16 | 15,5 | 15 |
| 14 | Час сушіння куль | $\tau_н$ | мин | 8 | 7,5 | 6,5 | 8 | 8,5 | 8 | 6,5 | 7,5 |
| 15 | Час нагріву куль | $\tau_с$ | мин | 3 | 3 | 3,5 | 3 | 2,5 | 3 | 3,5 | 3 |
| 16 | Коефіцієнт тепловіддачі | $\alpha$ | $\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$ | 19,7 | 17,3 | 16,4 | 16,2 | 15,7 | 15,5 | 15,2 | 15 |

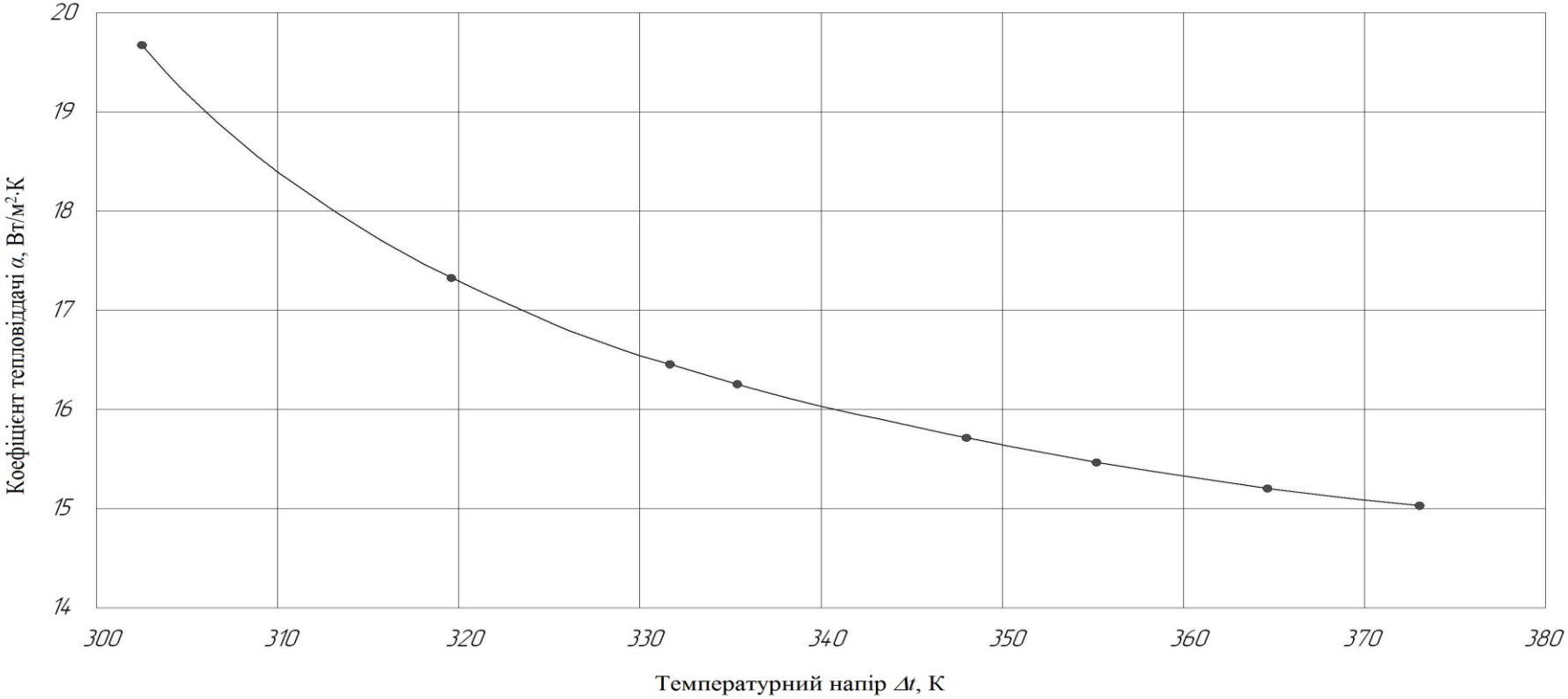



Рисунок 2.5 – Залежність коефіцієнта тепловіддачі від температурного напору в процесі випарювання

Крім того, складна ідентифікація гідродинамічних режимів у контактних випарних апаратах: процеси в них ускладнені взаємообміном різних фаз в результаті зриву крапель рідини газом або осаджень цих крапель на поверхні рідини, внаслідок проникнення газових бульбашок у рідку фазу тощо.

Суттєві труднощі виникають у зв'язку з необхідністю визначення розмірів міжфазної поверхні, розмірів бульбашок, крапель та інше. Очевидно, суттєво проявляється нестаціонарність процесів. Тому необхідно подальше накопичення дослідних даних у цій галузі, особливо даних щодо випаровування концентрованих розчинів. Актуальною залишається задача розробки методик розрахунку контактних апаратів з урахуванням перенесення тепла та маси на межі розділу фаз та просторової розподіленості параметрів.

# 3 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

## 3.1 Аналіз потенційно небезпечних та шкідливих факторів, що впливають на працівника лабораторії

Питання безпечної життєдіяльності людини необхідно вирішувати на всіх стадіях життєвого циклу, чи то розробка, впровадження в життя або експлуатація програми. Забезпечення безпечної життєдіяльності людини значною мірою залежить від правильної оцінки потенційно небезпечних та шкідливих виробничих факторів. Поодинокі за тяжкістю зміни в організмі людини можуть бути викликані різними причинами. Це можуть бути будь-які фактори виробничого середовища, надмірне фізичне та розумове навантаження, нервово-емоційна напруга, а також різне поєднання цих причин.

Небезпечні та шкідливі виробничі фактори за природою на організм людини поділяються на фізичні, хімічні, біологічні та психофізіологічні.

У приміщенні лабораторії на людину можуть негативно впливати такі фізичні фактори:

1) підвищена та знижена температура повітря;

2) надмірна запиленість та загазованість повітря;

3) підвищена та знижена вологість повітря;

4) недостатня освітленість робочого місця;

5) шум, що перевищує допустимі норми;

6) підвищений рівень теплового виділення;

7) небезпека ураження електричним струмом.

Біологічні, хімічні та психофізіологічні шкідливі виробничі фактори у цьому приміщенні відсутні [10].

Далі більш докладно розглянуті небезпечні та шкідливі фактори, що впливають на працівника лабораторії, що виникли під час виконання дипломної роботи.

Гігієнічні критерії оцінки та класифікацій умов праці засновані на принципі диференціації умов праці за ступенем відхилення параметрів виробничого середовища та трудового процесу від діючих гігієнічних нормативів відповідно до виявленого впливу цих відхилень на функціональний стан та здоров'я працюючих.

У приміщенні лабораторії на робочих діють такі шкідливі та небезпечні фактори:

– рівень шуму, що досягає 82 дБА, джерелом якого є вентиляційна установка;

– небезпека ураження електричним струмом.

Мікроклімат виробничих приміщень – це клімат внутрішнього середовища цих приміщень, який визначається поєднаннями температури, вологості та швидкості руху повітря, що діють на організм людини. Лабораторія є приміщенням легкої категорії (виконуються легкі фізичні роботи), тому повинні дотримуватися такі вимоги:

– оптимальна температура повітря – 22 ºС (допустима – 20 – 24 ºС);

– оптимальна відносна вологість – 40 – 60 % (допустима – трохи більше 75%);

– швидкість руху повітря трохи більше 0,1 м/с.

При високій температурі повітря самопочуття людини значно погіршується через несприятливі умови для серцево-судинної системи. За низької температури повітря виникає небезпека простудних захворювань.

Висока та низька вологість негативно впливає на самопочуття та здоров'я людини. При високій вологості повітря та підвищеній його температурі створюються умови для перегрівання організму у зв'язку з різким зменшенням випаровування поверхнею тіла. При високій вологості повітря в умовах зниженої температури значно збільшується тепловіддача організму, що може призвести до простудних захворювань [11].

Для створення та автоматичної підтримки в лабораторії незалежно від зовнішніх умов оптимальних значень температури, вологості, чистоти та

швидкості руху повітря, в холодну пору року використовується водяне опалення, в теплу пору року застосовується кондиціювання повітря.

Кондиціонер є вентиляційною установкою, яка за допомогою приладів автоматичного регулювання підтримує в приміщенні задані параметри повітряного середовища.

Для створення сприятливих умов праці важливе значення має раціональне освітлення. Незадовільне освітлення ускладнює проведення робіт, веде до зниження продуктивності праці та працездатності очей і може спричинити їх захворювання або нещасні випадки.

У зв'язку з тим, що природне освітлення лабораторії здійснюється через віконні отвори і є дуже слабким, на робочому місці має застосовуватися штучне освітлення. Штучне освітлення створюють електричним джерелом світла, яке включають при необхідності, регулюють інтенсивність світлового потоку та його спрямованість.

Виконаємо розрахунок штучного освітлення методом світлового потоку.

Вихідні дані:

Довжина приміщення – 8 м, ширина – 6 м, висота – 3 м.

Розрахункова висота: h = 3 - 0,8=2,2 м (0,8 м – висота розрахункової поверхні).

Площа приміщення: $S = 6 \cdot 8 = 48\,\text{м}^2$.

Визначимо індекс приміщення:

$$i = \frac{A \cdot B}{(A + B) \cdot h}, \tag{3.1}$$

де $A$ і $B$ – довжина та ширина приміщення, м;

$h$ - висота підвісу світильників над розрахунковою поверхнею, м.

$$i = \frac{6 \cdot 8}{(6 + 8) \cdot 2{,}2} = 1{,}56.$$

Оскільки стіни та стеля лабораторії бетонні, то приймаємо коефіцієнт відбиття стелі та стін $\rho_{стеля}$ = 50 %, $\rho_{стіни}$ = 30 % відповідно.

Знаходимо коефіцієнт використання світлового потоку $\eta$ = 50 %.

Необхідний світловий потік ламп світильників:

$$F = \frac{E \cdot k_з \cdot S \cdot z}{N \cdot \eta}, \qquad (3.2)$$

де $E$ – найменша нормована освітленість, $E$ = 300 лк так як розряд зорових робіт дорівнює 3;

$k_з$ - коефіцієнт запасу, $k_З$ = 1,4 (для приміщень, пов'язаних з роботою в лабораторії);

$S$ – площа приміщення, м$^2$;

$z$ – поправочний коефіцієнт переходу від найменшої освітленості до середньої (зазвичай значення його приймаються не більше 1,1 – 1,2), $z$ = 1,1;

$N$ – кількість світильників;

$\eta$ - коефіцієнт використання, тобто відносна частка потоку лампи, що падає на поверхню $S$.

Розрахуємо за формулою (3.2) добуток $F \cdot N$

$$F \cdot N = \frac{E \cdot k_з \cdot S \cdot z}{\eta} = \frac{300 \cdot 1{,}4 \cdot 48 \cdot 1{,}1}{0{,}5} = 44352 \text{ лм}. \qquad (3.3)$$

Знайдемо необхідну кількість ламп. Для освітлення виробничих приміщень вибір джерел світла проводять із урахуванням освітленості. При освітленості від 150 до 300 лк доцільно використовувати джерела світла типу ЛБ, ДРЛ, ЛБХ. Вибираємо люмінесцентні лампи типу ЛХБ80 (2х80 Вт); довжина лампи – 1,5 м, ширина 0,4 м, світловий потік цієї лампи – 3840 лм.

Отже, потрібна кількість ламп:

$$N = \frac{44352}{3840} \approx 12 \text{ шт}. \qquad (3.4)$$

Оскільки світильники дволампові, для забезпечення нормальної потужності освітлення навчальної лабораторії необхідно 6 світильників.

Приймаємо, що кількість світильників за довжиною складатиме 2 шт., а за шириною – 3 шт. [12].

Світильники з люмінесцентними лампами в основному розміщують рядами. Ряди слід розміщувати паралельно до стіни з вікнами.

Потрібно встановити два світильники в ряд. Застосовуємо світильники ШОД (так як ШОД дає рівномірніше освітлення) з люмінесцентними лампами ЛХБ потужністю 2×80 Вт і з потоком 3840 лм. Схема розташування світильників представлена рисунку 3.1.

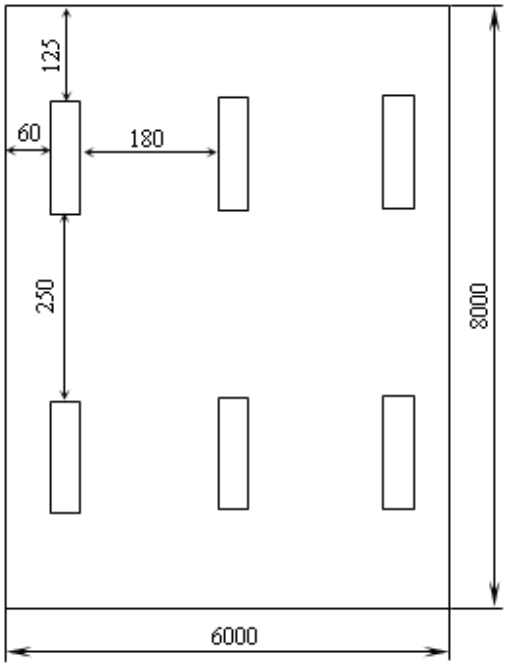



Рисунок 3.1 – Схема розташування світильників

$$la = \frac{1}{2} \cdot La \tag{3.5}$$

$$lв = \frac{1}{3} \cdot Lb \tag{3.6}$$

$$la = 1{,}25 \text{ м}, \; lв = 0{,}6 \text{ м}$$

У приміщеннях з низьким рівнем аеродинамічного шуму, яким є лабораторія, джерелом шуму є вентиляційна установка. Тривалий вплив цих шумів негативно впливають на емоційний стан персоналу. Для того, щоб знизити рівень шуму до оптимального значення, рекомендується застосовувати звукопоглинаюче покриття стін. У якості заходів для зниження шуму можна запропонувати наступне:

– облицювання стелі та стін звукопоглинаючим матеріалом (знижує шум на 6 – 8 дБ);

– встановлення звукопоглинаючого кожуха;

– встановлення в лабораторії обладнання, що здійснює мінімальний шум;

– раціональне планування приміщення.

Також зниження аеродинамічного шуму в джерелі досягають обмеженням швидкості обтікання деталей агрегату струменями повітря (газу), зменшенням вихроутворення в струменях (для чого необхідний раціональний профіль деталей, що обтікають повітрям).

Ослаблення шуму повітро(газо)проводів досягають плавністю руху повітряного потоку, плавними переходами в місцях зміни напрямку трубопроводу, застосуванням глушників.

Оскільки у лабораторії періодично виконуються роботи з перевищенням рівня звукового тиску, необхідно застосовувати засоби індивідуального захисту.

Для захисту органів слуху застосовують протишуми (антифони), зовнішні та внутрішні. Зовнішні протишуми (шумозахисні навушники) покривають вушну раковину. Внутрішні протишуми (заглушки, вкладиші) вставляють у зовнішній слуховий прохід; вони бувають суцільні, з каналом та з мембраною, по типу повітряних фільтрів. За родом матеріалу внутрішні протишуми бувають м'які та тверді. Перші виготовляють із губки, вати, марлі; іноді їх просочують мастилами, воском, смолами, парафіном, другі – з пластмас, ебоніту, гуми.

Ступінь ослаблення шуму залежить від конструкції протишуму та частоти. Заглушки послаблюють шум на 5 – 7 дБ при частотах до 500 Гц і на 15 дБ при частотах більше 3000 Гц. Протишуми конструкції МІОТ послаблюють шум до 8 дБ при частоті до 500 Гц і до 55 дБ при частоті 5000 – 7000 Гц.

Для захисту від низькочастотних шумів використовують заглушки – кліпси, які є гумовими пробками з плоскою торцевою поверхнею, закріплені на обідку з пружинного сталевого дроту діаметром 1,5 – 2 мм; обід охоплює голову ззаду [12].

### 3.2 Електробезпека

Приміщення лабораторії з небезпеки ураження електричним струмом можна зарахувати до 1 класу, тобто це приміщення без підвищеної небезпеки (сухе, безпилове, з нормальною температурою повітря, ізольованими підлогами та малим числом заземлених приладів). На робочому місці працівника лабораторії з усього обладнання металевим є лише випарний апарат із проміжним твердим теплоносієм. Електробезпека приміщення забезпечується відповідно до ПУЕ. Небезпечний та шкідливий вплив на людей електричного струму, електричної дуги та електромагнітних полів проявляється у вигляді електротравм та опіків. Ступінь небезпечного та шкідливого впливу на людину електричного струму, електричної дуги та електромагнітних полів залежить від:

- роду та величини напруги та струму;
- частоти електричного струму;
- шляхи струму через тіло людини;
- тривалості впливу на організм людини.

Основними заходами запобігання ураженням електричним струмом в лабораторії є захист від дотику до частин електрообладнання, що знаходяться під напругою, і застосування захисного заземлення. Інші заходи захисту –

захисне відключення, застосування малої напруги – мають обмежене застосування.

Оскільки в умовах лабораторії небезпечний вплив на людину будь-якого відчутного струму, захисту від випадкового дотику підлягають усі струмопровідні частини незалежно від напруги.

Захист від дотику до струмопровідних частин електричної установки досягається ізоляцією, огорожею, недоступним розташуванням струмопровідних частин, використанням дистанційного керування, блокування та попереджувальної сигналізації.

Основна причина аварії та нещасних випадків – пошкодження ізоляції.

Надійна робота електротехнічного обладнання визначається сталістю електричних, хімічних та механічних властивостей ізоляції та відповідність їх умовам експлуатації.

Огородження струмопровідних частин електричного обладнання досягається розміщенням його в окрему камеру, укриття кожухом або сітчастою огорожею.

Для захисту людини в лабораторії при дотику до металевих частин електричної установки, що випадково опинилися під напругою, застосовують метод захисного заземлення - навмисне електричне з'єднання із заземлюючим пристроєм. При цьому земля використовується як провідник в аварійному ланцюзі.

Призначення захисного заземлення - створення між металевими конструкціями або корпусом електричного пристрою і землею електричного з'єднання досить малого опору, щоб у разі замикання на землю при дотику людини через тіло пройшов струм малої величини, безпечний для організму [12].

Розглянемо основні причини ураження працівника лабораторії електричним струмом на робочому місці:

– дотик до металевих неструмопровідних частин випарного апарату, які можуть опинитися під напругою внаслідок пошкодження ізоляції;

– заборонене використання електричних приладів, таких як електричні плити, чайники, обігрівачі.

Оскільки всі струмопровідні частини випарного апарату ізольовані, то випадковий дотик до струмоведучих частин виключено. Для забезпечення захисту від ураження електричним струмом при дотику до металевих неструмовідних частин, які можуть опинитися під напругою внаслідок пошкодження ізоляції, я рекомендую застосовувати захисне заземлення. Заземлення корпусу випарного апарату забезпечене підведенням заземлювальної жили до розеток живлення. Опір заземлення 4 Ом, згідно (ПВЕ) для електроустановок з напругою до 1000 В.

Основним організаційним заходом є інструктаж і навчання безпечним методам праці, а також перевірка знань правил безпеки та інструкцій відповідно до посади стосовно виконуваної роботи. Під час проведення незапланованого та планового ремонту випарного апарату виконуються такі дії: відключення установки від мережі; перевірка відсутності напруги.

Після виконання цих дій проводиться ремонт несправного обладнання. Якщо ремонт проводиться на струмопроводящих частинах, що знаходяться під напругою, виконання роботи проводиться не менше ніж двома особами із застосуванням електрозахисних засобів.

### 3.3 Пожежна безпека

Ступінь вогнестійкості будівель приймається залежно від їх призначення, категорії вибухопожежної та пожежної небезпеки, поверховості, площі поверху в межах пожежного відсіку. Будівля, в якій знаходиться лабораторія з пожежної небезпеки будівельних конструкцій, відповідно до ОНТП 24-86, відноситься до категорії Д (малопожежонебезпечна), оскільки тут присутні горючі (книги, документи, меблі) і важкогорючі речі (різне лабораторне обладнання), які при взаємодії із вогнем можуть горіти без вибуху. За конструктивними характеристиками

будівлю можна віднести до будівель з несучими та огороджуваними конструкціями, з природних або штучних кам'яних матеріалів, бетону або залізобетону, де для перекриттів допускається використання дерев'яних конструкцій, захищених штукатуркою або важкогорючими листовими, а також плитними матеріалами. Отже, ступінь вогнестійкості будівлі можна визначити як третій (III) [10].

Причинами виникнення пожежі в лабораторії можуть бути:

- несправності електропроводки, розеток та вимикачів, які можуть призвести до короткого замикання або пробою ізоляції;

- використання пошкоджених (несправних) електроприладів;

- використання в приміщенні електронагрівальних приладів з відкритими нагрівальними елементами;

- виникнення пожежі внаслідок влучення блискавки до будівлі;

- займання будівлі внаслідок зовнішніх впливів;

- неакуратне поводження з вогнем та недотримання заходів пожежної безпеки.

В лабораторії рекомендується використовувати для гасіння пожеж вуглекислотні, порошкові, пінні та повітряно-пінні вогнегасники [37].

У лабораторії для гасіння пожеж встановлено газовий вогнегасник. Це вуглекислотний вогнегасник ВВ–5, в якому як вогнегасну речовину застосовують зріджений діоксид вуглецю (вуглекислоту).

Також для гасіння пожеж у лабораторії використовується ручний пожежний інструмент – це інструмент для розкриття та розбирання конструкцій та проведення аварійно-рятувальних робіт під час гасіння пожежі. До них відносяться: гаки, ломи, сокири, ведра, лопати, ножиці для різання металу. Інструмент розміщується на видному та доступному місці на стендах та щитах.

Для швидкого виявлення та повідомлення про місце виникнення пожежі у лабораторії є автоматична пожежна сигналізація та автоматична система пожежогасіння. Як автоматична пожежна сигналізація

використовується АДС (автоматичний димовий сповіщувач). Принцип його дії заснований на тому, що продукти горіння впливають на іонізаційний струм, що приводить в дію електромагнітне реле, яке включає систему сигналізації.

Для зв'язку використовують телефон, радіотелефон, радіо чи інші засоби першого зв'язку, що знаходяться у вищому навчальному закладі.

Необхідні заходи для виключення пожежі включають своєчасний ремонт електроприладів, якісне виправлення поломок, не використання несправних електроприладів.

З метою запобігання пожежі пропоную проводити з інженерами, які працюють у лабораторії, протипожежний інструктаж, на якому ознайомити працівників із правилами протипожежної безпеки, а також навчити використання первинних засобів пожежогасіння.

Особливу увагу необхідно приділяти евакуації людей із приміщень. Евакуація поводиться заздалегідь спланованими шляхами, які намагаються зробити мінімальними для проходження людьми до безпечного місця. Схеми евакуації розташовані у доступних для зору людини місцях. Всі люди, що знаходяться в будівлі, повинні суворо дотримуватися цих розроблених інструкцій для того, щоб під час екстреної ситуації не сталося тисняви, травм, пошкоджень або інших неприємних речей.

# ВИСНОВКИ

1. Створення ефективних систем очищення промислових стічних вод має важливе значення для багатьох галузей промисловості: хімічної, вугільної, металургійної, енергетичної та ін. Велика різноманітність сольового складу стічних вод і відмінність у потужності та цільовому призначенні знешкоджувальних установок не дозволяють вибрати будь-який один універсальний метод очищення.

2. У загальній частині роботи було проаналізовано чотири основні методи очищення мінералізованих стоків. Використання для знешкодження високомінералізованих стічних вод більшості традиційних методів зазвичай пов'язане з необхідністю вирішення низки проблем, основними з яких є утилізація висококонцентрованих розсолів, висока вартість знесолення, а також великі енерговитрати. Тим не менш, найбільш перспективним є метод термічного знешкодження із застосуванням проміжного теплоносія та використанням вторинних низькопотенційних енергоресурсів. У цьому виключається проблема накипоутворення, оскільки технологічним процесом передбачається максимальне відкладення солей на шарі завантаження.

3. Як проміжний теплоносій найбільш прийнятно використовувати металеві кулі, так як вони зручні при обробці в кульовому млині, мають хорошу теплопровідність і міцність. Основною перевагою даного методу є можливість вилучення мінеральних забруднень у твердому вигляді, що містяться в стічних водах, а також використання теплоносія вторинних низькопотенційних енергоресурсів.

4. У спеціальній частині були розглянуті основні характеристики теплоносія, що впливають на гідродинамічні та теплові режими випарного апарату. Для дослідження цих режимів випарювання високомінералізованих стічних вод на проміжному твердому теплоносії було виготовлено лабораторну установку та визначено методику проведення процесу

випарювання. Загалом, за результатами досліджень, циклічне випарювання високомінералізованих розчинів на проміжному твердому теплоносії призводить до утворення та зростання плівки солей на елементах завантаження. Таким чином, відбувається зменшення порізності шару до критичного значення та зростає гідравлічний опір проміжного твердого теплоносія. Для подальшої ефективної експлуатації випарного апарату необхідно щоб порізність зернистого шару в процесі випарювання була якнайбільша свого критичного значення.

5. У розділі «Охорона праці та техногенна безпека» було розроблено заходи з техніки безпеки, промислової санітарії та протипожежної техніки, а також виконано розрахунки штучного освітлення лабораторії, в якій знаходиться випарний аппарат та виконувалися дослыдження..

# ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Навчально-методичний посібник «Технології захисту водного середовища» для спеціальностей 101 «Екологія», 183 «Технології захисту навколишнього середовища» всіх форм навчання. Полтава: НУ «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Миколаїв : Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова. 2022. 306 с.

2. Сніжко С. І. Оцінка та прогнозування якості природних вод. Київ : Ніка-Центр, 2001. 264 с. 59,

3. Ваганов І. І., Маєвська І. В., Попович М. М. Інженерна геологія та охорона навколишнього середовища. Вінниця : Універсум, 2009. 360 с.

4. Промислова екологія: [Електорнний ресурс]. Режим доступу: http://pidruchniki.com/1584072041610/ekologiya/promislova_ekologiya

5. Сучасні підходи очищення стічної води біотехнологічних виробництв. Промислова екологія [Електронний ресурс] / [Струтинська А. В., Косоголова Л. О., Гаркава В. Г., Нежанківська В. Є.]. Київ : Ековидавництво, 2011. Режим доступу: http://eco.com.ua/content/suchasni-pidkhodi-ochishchennya-stichnoi-vodibiotekhnologichnikh-virobnitstv

6. Айрапетян Т. С. Технологія ефективного водокористування у промисловості : конспект лекцій для студентів всіх форм навчання спеціальності 192 – Будівництво та цивільна інженерія (освітня програма «Гідротехніка (водні ресурси)» / Т. С. Айрапетян ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. 106 с.

7. Ресурсоефективне використання водних ресурсів. Конспект лекцій [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 101 «Екологія», 161 «Хімічні технології та інженерія» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: І. М. Трус, М. Д. Гомеля, М. М. Твердохліб. Електронні текстові дані (1 файл: 3,65 Мбайт). Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 161 с.

8. Айрапетян Т. С. Технологія очистки стічних вод : конспект лекцій для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за спеціальністю 194 – Гідротехнічне будівництво, водна інженерія та водні технології) / Т. С. Айрапетян; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. 120 с.

9. Трофіменко М. О., Зеленська Л. О., Гаряга О. В. Екологічна експертиза процесу очищення високомінералізованих стічних вод хімцеха ТЕЦ. Збірник наукових праць Національного гірничого університету. 2011. № 36(2). С. 229-234.

10. Геврик Є. О. Охорона праці: Навчальний посібник для студентів вищих навчальних закладів. Київ : Ельга, Ніка-Центр, 2003. 280 с.

11. Ткачук К. Н. Филипчук В. Л., Каштанов С. Ф. Виробнича санітарія. Рівне : НУВГП, 2012. 443 с.

12. Ткачук К.Н., Халімовський М.О., Зацарний В.В. Основи охорони праці. Київ : Основа, 2006. 448 с.